

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE RESPIROMETRİK YÖNTEM İLE KİNETİK VE
STOKİYOMETRİK KATSAYILARIN BELİRLENMESİ**

ABDULKADİR ÇAĞLAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. GÜLEDA ENGİN**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE RESPIROMETRİK YÖNTEM İLE KİNETİK VE
STOKİYOMETRİK KATSAYILARIN BELİRLENMESİ**

Abdulkadir ÇAĞLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 09.07.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mahir İNCE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Neşe TÜFEKÇİ
İstanbul Üniversitesi

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi 112Y308 numaralı araştırma projesi ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başından sonuna kadar bilgi ve deneyimleriyle katkılarını esirgemeyen tez danışmanım ve saygı değer hocam Prof. Dr. Güleda ENGİN'e gösterdiği ilgi ve alakadan dolayı teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmanın hazırlanmasında bilgi ve tecrübeleriyle katkılarından ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı hocam Doç. Dr. Mahir İNCE'ye teşekkür ederim.

Çalışmam sürecinde her türlü katkılarından ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı hocam Doç. Dr. M. Sinan BİLGİLİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel çalışmalardaki yardımları ve çalışmam boyunca katkılarından dolayı Arş. Gör. Hanife Sarı ERKAN'a, laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Çevre Mühendisi Burcu KULİL'e ve Çevre Mühendisi Gökem GÜNALP'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı daima yanımda olan aileme ve ayrıca çalışmam boyunca manevi desteğini esirgemeyen nişanlım Arş. Gör. Sümeyra ELMACI'ya teşekkür ederim.

Temmuz, 2015

Abdulkadir ÇAĞLAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
MEMBRAN BİYOREAKTÖRLER.....	5
2.1 Terminolojisi ve Prensipleri	5
2.2 Genel Prosesleri	7
2.3 MBR Konfigürasyonları	8
2.3.1 Batık MBR'ler	9
2.4 İşletme Prensipleri	10
2.4.1 Biyolojik arıtma	11
2.4.2 Havalandırma	14
2.5 Avantaj ve Dezavantajları	14
2.5.1 Avantajları.....	15
2.5.2 Dezavantajları	15
BÖLÜM 3	
AKTİF ÇAMUR PROSESİ VE AKTİF ÇAMUR RESPIROMETRİSİ	16
3.1 Biyokimyasal Oksidasyon	16

3.2	Enzimler ve Michaelis-Menten Modeli	18
3.3	Biyolojik Prosesleri Etkileyen Faktörler	19
3.3.1	Sıcaklık	19
3.3.2	pH	20
3.3.3	Toksisite	20
3.4	Aktif Çamur Prosesi	21
3.4.1	Evsel ve Endüstriyel Atıksular	21
3.5	Atıksu Arıtımında Mikroorganizmaların Rolü	22
3.6	Havalandırma ve Oksijen Transferi	22
3.6.1	Oksijen Transfer Mekanizması	23
3.6.2	Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler	25
3.6.3	Oksijen Transferinin Ölçümü	26
3.7	Aktif Çamur Respirometrisi	27
3.7.1	Winkler Şişesi Metodu	28
3.7.2	Wargburg Metodu	28
3.7.3	Sapromat Metodu	29
3.7.4	Hatch respirometrisi	30
3.7.5	Açık Respirometri	30
3.8	Respirometrik Ölçümler	31
3.9	Açık Respirometri ile Kinetik ve Stokiyometrik Parametrelerin Belirlenmesi	36
3.10	Oksijen Transfer Katsayısının (K_La) Belirlenmesi	36
3.11	μ ve μ_{max} ' in Belirlenmesi	37
3.12	K_s Parametresinin Belirlenmesi	39
3.13	k_d Parametresinin Belirlenmesi	41
3.14	Y Parametresinin Belirlenmesi	41

BÖLÜM 4

MATERYAL-METOT.....	44
4.1 Besleme İçin Kullanılan Sentetik Atıksular.....	44
4.2 İşletilmekte Olan Membran Biyoreaktörler.....	45
4.3 Kullanılan Deney Düzeneği	46
4.4 K_{La} , Kinetik ve Stokiyometrik Katsayıları Belirleme Çalışmaları	48
4.4.1 K_{La} Katsayısını Belirleme Çalışması.....	49
4.4.2 μ , μ_{max} , K_s ve Y Parametrelerini Belirleme Çalışması	50
4.4.3 k_d Katsayısını Belirleme Çalışması.....	51
4.5 Yapılan Analizler.....	51

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....		53
5.1	K _{La} Parametresi Belirleme Çalışması Sonuçları	53
5.2	μ, μ _{maks} , K _s ve Y Parametrelerini Belirleme Sonuçları	56
5.3	k _d Katsayısını Belirleme Çalışması Sonuçları	61

BÖLÜM 6

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	68

SİMGE LİSTESİ

a	Özgöl yüzey alanı
α	$K_L a$ düzeltme faktörü
β	C_s düzeltme faktörü
C_e	Oksijen denge konsantrasyonu
C_{min}	t_2 anındaki oksijen konsantrasyonu
C_s	Oksijen doymunluk konsantrasyonu
C_L	Sudaki oksijen konsantrasyonu
D_e	Gazın türbülans difüzyon katsayısı
D_g	Gaz filmi difüzyon katsayısı
D_L	Difüzyon katsayısı
F	Respirogramın alanı
H	Henry sabiti
k	Maksimum substrat kullanım hızı
K_g	Gaz film katsayısı
K_L	Sıvı film katsayısı
$K_L a$	Oksijen transfer katsayısı
K_m	Michaelis-Menten sabiti
K_s	Yarı doymunluk sabiti
k_d	Endojen ayrışma katsayısı
N	Birim zamandaki kütle transferi
O_r	Respirogramın alanı
P	Oksijenin kısmi basıncı
R_e	Eksojen oksijen kullanım hızı
r_e	Substrat oksijen kullanım hızı
r_i	Endojen solunum hızı
r_s	çamur solunum hızı
Q	Debi
S	Substrat konsantrasyonu
X	Mikroorganizma konsantrasyonu
V	Hacim
V	Kataliz hızı
Y	Dönüşüm faktörü
μ	Spesifik çoğalma hızı
μ_{maks}	Maksimum çoğalma hızı
ΔS_0	Tüketilen oksijen miktarı
θ	Çamur yaşı

KISALTMA LİSTESİ

ASP	Aktif çamur prosesi
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
C/N	Karbon-azot oranı
COD	Kimyasal oksijen ihtiyacı
CO ₂	Karbondioksit
CFV	Çapraz akış hızı
FS	Flet sheet
F/M	Yiyeceğin mikroorganizmaya oranı
HF	Hollow fiber
HRT	Hidrolik bekleme süresi
H ₂ O	Su
IMBR	Batık membran biyoreaktör
KOH	Potasyum hidroksit
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LHM	Litre metrekare saat
MF	Mikrofiltrasyon
MLSS	Askıda Katı Madde
MBR	Membran biyoreaktör
MT	Multi tübüler
NH ₄ Cl	Amonyum klorür
N ₂	Azot gazı
OC	Oksijen tüketimi
O ₂	Oksijen
RO	Ters ozmos
SMBR	Yan akışlı membran biyoreaktör
SRT	Çamur bekletme süresi
TMP	Trans membran basıncı
UF	Ultra filtrasyon

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 MBR sistemlerinin konfigürasyonları	8
Şekil 2. 2 Batık MBR.....	9
Şekil 2. 3 MBR parametreleri ve kirlenme ilişkisi	10
Şekil 3. 1 Michaelis-Menten Kinetikleri	18
Şekil 3. 2 Sıcaklığın enzim aktivitesine etkisi	20
Şekil 3. 3 Winkler Şişesi	28
Şekil 3. 4 Warburg Respirometrisi	29
Şekil 3. 5 Sapromat Respirometrisi	29
Şekil 3. 6 Hatch Respirometrisi	30
Şekil 3. 7 Açık Respirometri örneği	31
Şekil 3. 8 Respirometrik ölçümlerin çizimi	32
Şekil 3. 9 Endojen oksijen kullanım hızı	33
Şekil 3. 10 Tüm oksijen transfer hızı	34
Şekil 3. 11 Respirogram	35
Şekil 3. 12 Substrat konsantrasyonuna göre büyüme hızı	40
Şekil 3. 13 $1/S$ 'e karşı $1/\mu$ 'nün grafiği	40
Şekil 4. 1 İşletilmekte olan MBR'ler	46
Şekil 4. 2 Deney düzeneği	47
Şekil 4. 3 Deney düzeneğinin şematik gösterimi	47
Şekil 5. 1 C/N oranı 6'nın K_L a grafiği	54
Şekil 5. 2 C/N oranı 21'in K_L a grafiği	54
Şekil 5. 3 C/N oranı 40'ın K_L a grafiği	55
Şekil 5. 4 C/N oranı 6'nın respirogramları	58
Şekil 5. 5 C/N oranı 6'nın r_e grafiği	59
Şekil 5. 6 C/N oranı 21'in respirogramları	59
Şekil 5. 7 C/N oranı 21'in r_e grafiği	60
Şekil 5. 8 C/N oranı 40'ın respirogramları	60
Şekil 5. 9 C/N oranı 40'ın r_e grafiği.....	61
Şekil 5. 10 C/N oranı 6'nın r_s grafiği	62
Şekil 5. 11 C/N oranı 21'in r_s grafiği	62
Şekil 5. 12 C/N oranı 40'ın r_s grafiği	63

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Sentetik atıksu reçetesi	45
Çizelge 5.1 Literatürde verilen K_L a değerleri	56
Çizelge 5.2 Literatürde verilen kinetik parametrelerin karşılaştırılması	67

MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE RESPIROMETRİK YÖNTEM İLE KİNETİK VE STOKİYOMETRİK KATSAYILARIN BELİRLENMESİ

Abdulkadir ÇAĞLAK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güleda ENGİN

Evsel ve endüstriyel atıksuların ortamlara deşarjlarından önce kirliliğinin azaltılması ya da giderilmesi için en yaygın yol biyolojik olarak arıtılmalarıdır. Atıksu arıtma sistemlerinin en çok bilineni de aktif çamur prosesleridir. Atıksuyun aktif çamur ile biyolojik olarak arıtılması atıksudaki çözünmüş organik ve inorganik maddeleri gidermek, kolloidal ve çökelmeyen katıları koagüle etmektir.

Membran biyoreaktör sistemleri konvansiyonel aktif çamur proseslerine göre; yüksek biyokütle konsantrasyonları içerebilmeleri, yüksek organik yükü karşılayabilmeleri, düşük F/M oranlarında çalışabilmeleri ve şok yüklemelere daha dirençli olma gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle farklı endüstrilerin atıksuları veya bu endüstrileri temsil edebilecek sentetik atıksuların arıtma çalışmaları membran biyoreaktörlerde yapılabilmektedir.

Farklı C/N oranlarına sahip olan sentetik atıksuların arıtıldığı ve farklı çamur yaşlarında işletilen membran biyoreaktör sisteminde mikroorganizmaların aktiviteleri, çoğalma hızları, oksijen tüketim hızları farklı olmaktadır.

Sabit sıcaklık, basınç ve gaz debisi altında aerobik biyolojik arıtma sistemlerindeki aktif çamurun aktivitesi çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile direkt olarak alakalıdır. Böylece sistemdeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun izlenmesi ile sistemdeki mikroorganizmaların performansı belirlenebilir. Aerobik koşullardaki aktif çamurun

performansını belirlemek için oksijen kullanım hızından faydalanılarak kullanılan yöntem respirometrik metot olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada gerçek atıksuları temsil edebilecek nitelikteki farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksuları arıtan membran biyoreaktörlerdeki aktif çamurların respirometrik yöntem ile kinetik ve stokiyometrik parametrelerini belirleme çalışması yapılmıştır. C/N oranının değişmesiyle mikroorganizmaların substrat kullanım hızları, oksijen tüketim hızları ve çoğalma hızlarının farklı olduğu görülmüştür. Elde edilen parametreler değerlendirildiğinde sentetik atıksuların gerçek atıksuları temsil ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Membran biyoreaktör, atıksu arıtma, C/N oranı, aktif çamur, respirometrik yöntem, kinetik ve stokiyometrik parametreler.

**DETERMINATION OF KINETIC AND STOICHIOMETRIC PARAMETERS
USING RESPIROMETRIC METHOD IN A MEMBRANE BIOREACTOR**

Abdulkadir ÇAĞLAK

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Güleda ENGİN

Biological treatment of municipal and industrial wastewaters before discharge into water media is the most common way for pollution prevention. The most common wastewater treatment system is known as the activated sludge process. The main aim of biological treatment of wastewater using activated sludge process is to remove dissolved organic and inorganic matters, colloidal and nonsettled solids.

The membrane bioreactors have some advantages compared to conventional activated sludge processes. The advantages can be listed as: high MLSS concentrations, high organic loading, low F/M rates, and resistance shocks loadings. Therefore, originated from different industries can be treat in MBRs. The activities, growth rates and consumption oxygen of microorganisms are different in the MBRs treating synthetic wastewaters having different C/N ratios.

It is known that the activities of aerobic biological treatment systems at constant temperature, pressure and gas flow are directly related to dissolved oxygen concentration. Therefore, by monitoring dissolved oxygen concentration, it is possible to monitor the performance of microorganisms. In order to determine the performance of the microorganisms in an aerobic system, respirometric method is generally used.

In this study, kinetic and stoichiometric coefficients of the activated sludges in three MBRs treating different synthetic wastewaters having different C/N ratios were determined by respirometric methods. The results indicated that a change in the C/N ratios change oxygen uptake rates, substrat utilization rates and growth rates of microorganisms. The results also indicated that the synthetic wastewaters used in this study were able to represent real wastewaters.

Keywords: Membrane bioreactor, wastewater treatment, C/N ratio, activated sludge, respirometric method, kinetic and stoichiometric coefficients

1.1 Literatür Özeti

Aktif çamur sistemlerinin davranışını tanımlamak için kinetik parametrelerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu parametreler, zamanla giderilecek substratın miktarını ve oluşacak biyokütlenin miktarını tahmin etmek, ayrıca arıtma tesisinin tasarımında ve işletilmesinde dikkate alınacak hususları belirlemek için kullanılmaktadır.

Michaelis ve Menten veya daha yaygın ismiyle Monod eşitliğine göre aktif çamur metabolizmasını tanımlamak için bazı kinetik ve stokiyometrik parametreler gereklidir. Kesikli deney teknikleri bazı dezavantajları olmasına rağmen prosesi en iyi şekilde tanımlamaktadır. Açık respirometri metodu çamuru aynı fiziksel koşullarda temsil edebilmesi ve basit, hızlı ve uygulanabilir olması nedenleriyle kesikli proses için uygun olduğu belirtilmektedir [2].

J.Blok [2] açık respirometri ile yaptığı çalışmayla oksijen transfer katsayısını, endojen oksijen kullanım hızını ve eksojen oksijen kullanım hızını belirlemiştir. Eksojen oksijen kullanım değerlerinden respirogram oluşturmuş ve respirogramın alanından Y parametresinin bulunduğunu ifade etmiştir. Maksimum eksojen oksijen kullanım hızından Y parametresi yardımıyla maksimum spesifik çoğalma hızının bulunabileceğini açıklamıştır. 1976'da [3] yaptığı çalışma ile de substrat konsantrasyonuna göre spesifik çoğalma hızı grafiğinin eğiminden K_m (K_s) parametresinin hesaplama metodunu göstermiştir.

Ros vd. [4] açık respirometri kullanarak kısa süreli BOİ'yi tanımlamışlar, aktif çamur sistemi için oksijen kullanım hızını, toksik maddelerin aktif çamur respirasyonuna etkisini ve aktif çamurun diğer atıksu tiplerine ve bazı diğer parametrelere adaptasyonunu araştırmışlardır. Oksijen transfer katsayısını, respirogramı kullanarak respirometrik olarak BOİ'nin bulunuşunu göstermişlerdir.

Aktif çamurun ve aktif çamur süspansiyonuna atıksu ilavesiyle oluşan reaksiyonların respirasyonunun ölçülmesiyle örneğin; reaksiyon süresi, BOİ, biyodegradasyon eğrisi, maksimum substrat respirasyon hızı, atıksuyun toksisitesi, aktif çamurun yeni atıksuya adaptasyonu, arıtma tesisi için oksijen tüketimi gibi bazı parametreler belirlenebilmektedir [1].

Ros [1] aktif çamur respirometrisi ile daha detaylı araştırma yaparak, aktif çamur prosesini, havalandırma ve oksijen transferini, kullanılan respirometri çeşitlerini, respirometrik olarak BOİ'nin bulunuşunu ve farklı denemeler yaparak diğer yöntemlerle bulunan değerlerin karşılaştırılmasını, respirometrik hataları, atıksuyun toksikolojisini, aktif çamurun adaptasyonunu ve oksijen tüketimini daha detaylı açıklamaktadır.

Respirometrik olarak İnce [6] sızıntı suyu arıtan yüksek performanslı kompakt MBR için kinetik ve stokiyometrik parametreleri belirlemiş ve Topaloğlu [7] patates işleme endüstrisi atıksuyu arıtan termofilik püskürtme çevrimli MBR için parametreleri belirlemişlerdir.

Membran prosesiyle konvansiyonel aktif çamur prosesinin birleşimi olan membran biyoreaktörler etkin por çapı $0.1 \mu\text{m}$ 'nin altında oldukça iyi bir şekilde dezenfekte edilmiş ve arıtılmış çıkış suyu sağlamaktadır. Ayrıca yüksek biyokütle konsantrasyonuna sahip olduğu için tank boyut gerekliliğini azaltmakta ve biyolojik arıtmanın verimini artırmaktadır [5].

Çoğu batık MBR 40 günden yüksek çamur yaşında çalıştırılması sebebiyle batık MBR'lerin işletme parametreleri konvansiyonel biyolojik atıksu arıtma sistemlerinden farklı olacaktır. Literatür araştırmaları batık MBR'lerin biyokinetik katsayıları ile ilgili bilginin eksik olduğunu ortaya koymuştur [33]. Al-Malack [33] yaptığı çalışmada MBR

için MLSS konsantrasyonu ile parametrelerin nasıl değiştiğini klasik yöntem ile göstermiştir.

Durmaz ve Sanin'in [34] yapmış olduğu çalışmada C/N oranının aktif çamurun fiziksel ve yüzey kimyası özelliklerine önemli etkileri olabileceğini ortaya koymuşlardır. Kararlı halde C/N oranının artmasıyla hem mikroorganizma konsantrasyonunun hem de üretilen hücre dışı polimerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca çamurun susuzlaştırılmasının ve çökmesinin zorlaşarak viskoz hale geldiğini, yüzey hidrofobisitesinde azalma ve yüzey yükünde artma olduğu sonucuna varmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Biyolojik arıtma prosesi, çözünmüş ve askıda organik kimyasal bileşikler biyolojik parçalanmayla gidermenin yanında askıdaki maddeleri fiziksel ayırarak gidermektedir. MBR'lerdeki biyolojik arıtma prosesi; konvansiyonel aktif çamur prosesi olup çamur yaşı, hidrolik bekleme süresi, organik yük, havalandırma, biyokütle için kinetik ve stokiyometrik parametreler göze çarpmaktadır.

Membran biyoreaktörlerin de tasarım ve işletilmeleri hakkında daha detaylı bilgiye sahip olmak için kinetik ve stokiyometrik katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. MBR'ler uzun çamur yaşlarında çalıştırabilmeleri sebebiyle farklı ve yüksek yüklü endüstriyel atıksu arıtımına uygundur. MBR'ler yüksek ve düşük organik yüklerden daha az etkilenmektedirler. Dolayısıyla bu gibi durumlarda işletilen MBR'lerdeki aktif çamurların biyokinetik parametreleri de değişmiş olmaktadır.

Bazı endüstriyel atıksular karbon açısından zenginken bazı endüstrilerin de karbon içeriği düşük seviyededir. İdeal olan evsel atıksuyun C/N oranından farklı olan endüstriyel atıksuların biyolojik olarak arıtımı zorlaşmaktadır. Sentetik olarak hazırlanan atıksuların C/N oranları değiştirilebilmektedir. Hazırlanan atıksuların da gerçek atıksuyu temsil etmesi araştırmalarla ortaya konmaktadır.

Aktif çamurun faaliyetiyle ilgili olan kinetik ve stokiyometrik parametreler farklı yöntemlerle belirlenebilmektedir.

Bu çalışmayla farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksuları arıtan membran biyoreaktörlerdeki aktif çamurların kinetik ve stokimetric parametrelerinin respirometric yöntem ile belirlenmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Atıksu arıtımı için kullanılan biyolojik proseslerin performansı substrat kullanımının ve mikrobiyal büyümenin dinamiklerine bağlıdır. Sistemin etkili tasarım ve işletimi meydana gelen biyolojik reaksiyonları ve mikroorganizmaların büyümesinin kontrolünü anlamayı gerektirmektedir.

Membran biyoreaktörler bazı avantajlarından dolayı endüstriyel atıksuların biyolojik olarak arıtımına uygun olduğu için tercih edilme sebebidir. Yapılan çalışmalar neticesinde gerçek atıksuları temsil edebilmesi neticesinde, kontrolü ve temin kolaylığı gibi avantajları sebebiyle gerçek atıksu yerine sentetik atıksu kullanılabileceği bildirilmektedir.

Aktif çamurun faaliyetlerini ortaya koyan kinetik ve stokiometrik parametrelerin belirlenmesi için kurulumu basit olan ve daha kısa sürede sonuç veren respirometric yöntem kullanılmıştır.

Endüstriyel atıksuları arıtan aktif çamurun parametreleri değiştiğinden bu çalışmayla gerçek atıksuları temsil edebilecek farklı C/N oranlarında hazırlanan atıksuları arıtan MBR'lerdeki aktif çamurun kinetik ve stokiometrik parametrelerin değişip değişmediği ortaya konacaktır.

Sentetik atıksuların gerçek atıksuları kinetik ve stokiometrik parametreler açısından temsil edip etmemesi değerlendirilecektir. Bulunan değerlerin yapılan çalışmalarla kıyaslanıp uygun aralıkta olup olmadığı incelenecektir.

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLER

Membran biyoreaktörler, konvansiyonel biyolojik arıtmaya entegre edilmiş membran filtrasyonunun kombinasyonu olan su ve atıksu arıtma prosesleridir. Arıtılan suyun aktif çamurdan ayrılması çöktürme havuzunda olmayıp membran filtrasyonuyladır. Temiz suyun aktif çamurdan ayrılmasında düşük basınçlı membran filtrasyonu olarak hem mikrofiltrasyon (MF) hem de ultrafiltrasyon (UF) kullanılmaktadır. İki ana MBR konfigürasyonu hem batık membranları hem de dış sirkülasyonu (yan-akış konfigürasyonu) kapsamaktadır (Şekil2.1). Batık MBR’lerde (SMBR) modül olarak hem hollow fiber hem de plaka membranlar kullanılabilir [14].

Son otuz yıldır MBR prosesleri çok çeşitli olarak araştırılmaktadır. Bu çalışmaların ana hedefi MBR proseslerinin fizibilitesini keşfetmek ve proses metotlarını artırmaktır. Çıkış kalitesi başarısı, yüksek çamur yüklemesi, sistem karışıklığı, suyun tekrar kullanımı ve çamurun sıfır büyüme potansiyeli üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bununla birlikte çoğu Arge çalışmaları uygulamaya ve evsel atıksu akımlarına uygulanabilirliklerindeki görülen eksikliklere dayanmaktadır [15].

2.1 Terminolojisi ve Prensipleri

Filtrasyon, iki veya daha fazla bileşimin sıvı akımdan ayrılması olarak tanımlanır. Genel kullanımda katı veya çözünmez partikülleri sıvı akımdan ayırmak olarak adlandırılır. Membran filtrasyonu bu uygulamalardan ortaya çıkarak genellikle sıvı akımda çözünmüş katıların ayrımını ve mikroorganizmalardan tuzlara kadar olan aralıktaki çeşitli maddeleri gidermek için atıksu arıtma tesislerinde kullanılan membran prosesleridir [15].

Membran prosesleri; por çaplarına göre, moleküler kesme ağırlığına göre ve işletme basınçlarına göre üç katagoriye ayrılabilir. Por apı küçülür veya moleküler kesme ağırlığı azalırsa, sudan diğerk materyalleri ayırmak için uygulanan basınç artmaktadır. Su arıtma biçimi temel proses seçimiyle belirlenebilmektedir.

Su ve atıksu arıtma membranları tipik olarak por çapları azalımına göre mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO) olarak sınıflandırılabilir. Genel kural olarak MF, protozoa ve bakteri gibi daha büyük mikroorganizmaları içeren askıda katıların giderimi için uygundur. UF, virüsler ile yaklaşık boyutu 20 nm'ye kadar olan organik makromoleküllerin giderimi için gereklidir. Daha küçük organikler ve çok değerlikli iyonlar NF ile giderilebilir ve RO'da bütün çözünmüş türlerin giderimi için uygundur [23].

MBR konseptlerinde genellikle uygulanan ve boyut üzerindeki temel filtre malzemesi olan prosesler; mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) prosesleridir. Membran ayırımında MF genellikle; emülsiyon haldeki yağlar, askıdaki katılar ve moleküler ağırlığı 50,000'den büyük olan makromoleküllerin ayırımında veya gideriminde kullanılmaktadır. MF'in por çapları yaklaşık 0,05 μm ile 2 μm arasındadır. UF ve MF çoğu boyut için çakışır ve genelde UF membranları özellikle bakteri ve virüslerin ayırımında ayırma seviyesi daha yüksektir. UF membranları, moleküler ağırlığı 5000'den büyük makromolekülleri ayırabilir ve por çapı 0,005 μm ile 0,1 μm arasında değişmektedir [15].

Biyolojik arıtma prosesi, çözünmüş ve askıda organik kimyasal bileşikleri biyolojik parçalanmayla gidermenin yanında askıdaki maddeleri fiziksel ayırarak gidermedir. Biyolojik arıtma, organiklerin gideriminin başarılabilmesi için canlı mikroorganizmaların yeterli seviyesinin sabit kalabileceği uygun reaktör şartlarına ihtiyaç duymaktadır. Biyolojik proseslerin rnekleri:

- Proses konfigürasyonuna göre sabit film ve askıda büyüme
- Besleme rejimine göre sürekli ve kesikli besleme
- Oksidasyon durumuna göre aerobik, anoksik ve anerobik

olarak sınıflandırılabilir. MBR'lerde ise proses konfigürasyonuna göre askıda büyüme, besleme rejimine göre sürekli, oksidasyon durmuna göre ise aerobik ve aerobik anoksik olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca MBR'lerin konfigürasyonu biyofilme destek için membran kullanılarak sabit film prosesinde de yapılabilir [13].

2.2 Genel Prosesleri

MBR'ler konvansiyonel atıksu arıtma prosesi ile filtrasyon prosesinin birleşimi olarak iki proses kapsamında incelenebilir. Membran filtrasyon prosesinde; membranların yapısı, çeşitleri ve modülleri etkili olup MBR tasarımında etkin rol oynamaktadır. Filtrasyon için işletimde akı, basınç ve tıkanma gibi etkenler önem kazanmaktadır.

Membran proseslerinin önemli noktası suyun membrandan geçmesi için basınç uygulanmasıdır. Bununla birlikte membran prosesleri sadece kirleticileri tutmak ve suyun geçişine izin vermek için kullanılmayıp; hem bileşenleri seçici olarak ekstrakte etmek (ekstraktif-toplu) hem de moleküler formdaki bir bileşiği tanımlamak (difüzyon) için kullanılmaktadır [13].

MBR'lerde biyolojik proses konfigürasyonu, reaktörde sabit biyofilm formu için bir destek tabakası üzerinde katman olabilen veya askıda olabilen formlar yada bazen bunların kombinasyonu olabilen biyokütle ile atıksuyun temas yolu olarak tanımlanmaktadır. Her iki konfigürasyon ayırma ihtiyacı olan aşırı biyokütle üretmektedir. Besleme rejimi hem sürekli hem de kesikli tarzında olup atıksuyun biyokütle ile buluşturma yolu olarak tanımlanmaktadır. Kesikli besleme aynı hücede biyolojik parçalanmaya ve temiz su ayırımına izin verdiği için alandan kazanılmış olmaktadır [13].

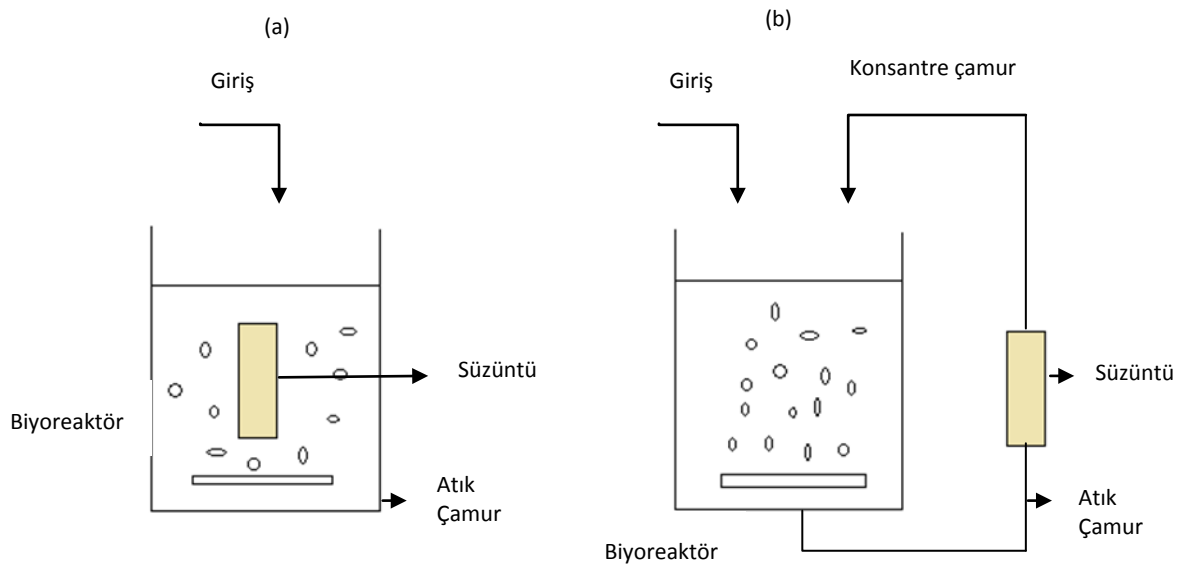
MBR'lerdeki biyolojik arıtma prosesi; konvansiyonel aktif çamur prosesi olup çamur yaşı, hidrolik bekleme süresi, organik yük, havalandırma, biyokütle için kinetik ve stokiyometrik parametreler göze çarpmaktadır. Arıtma prosesinde istenilen etkin işletme şartlarına göre, çamur yaşı, hidrolik ve organik yükleme, bekleme süresi ve çıkış suyu kalitesi belirlenebilir. Biyokütle ayırımı membran filtrasyonu ile yapıldığından yüksek MLSS konsantrasyonlarına ulaşılabilir ve sistem ani

yüklemeleri karşılayabildiğinden çıkış suyu kalitesinde ani değişimler azalabilmektedir. Ancak bazı durumlarda yüksek MLSS konsantrasyonu reaktördeki havalandırmayı ve membranlardaki tıkanmayı etkileyebilmektedir.

2.3 MBR Konfigürasyonları

MBR için konfigürasyon kelimesi, hem prosesi (biyoreaktör ile membranın entegrasyonu) ve membran modülünü ifade etmek için kullanılabilir. MBR proses konfigürasyonları batık MBR (IMBR) ve yan akımlı (SMBR)'ler olmak üzere iki ana konfigürasyondan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Ayrıca hidrolik işletmenin pompalama ve havalandırmalı olmak üzere iki biçimi vardır. Membran geometrisi ve konfigürasyonu yapılırken ticari MBR teknolojisinde baskın olan üç farklı membran türü; hollow fibre (HF), flat sheet (FS) ve multi tubüler (MT)dir [13].

Yüksek MLSS konsantrasyonlu aktif çamurun sürekli ayırımı için çapraz akış filtrasyonu uygundur. Kek tabakası oluşumunun kontrolü için kesme kuvveti kullanılabilmekte ve böylece sabit akı da elde edilebilmektedir. Batık MBR'de ise bu kesme kuvvetleri hava yükseltilmesi ve sıvının türbülansı ile oluşturulmaktadır [14].

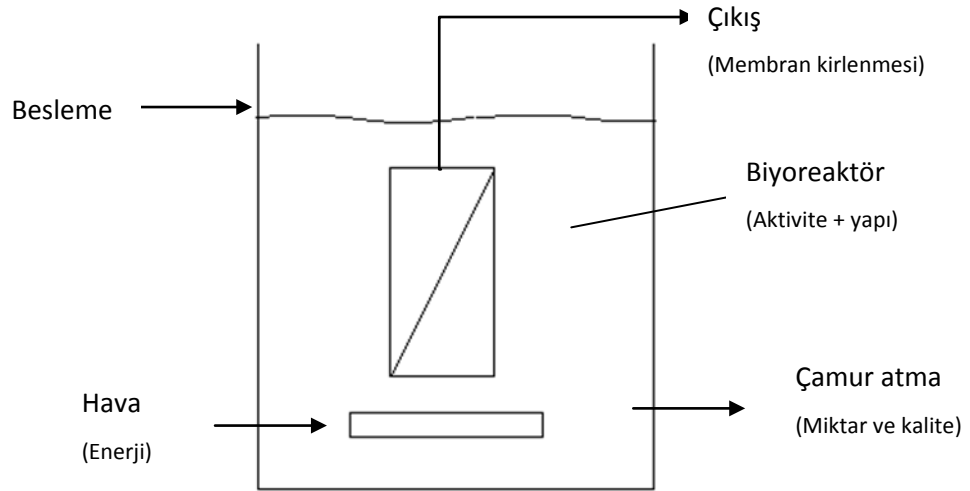


Şekil 2.1 MBR sistemlerinin konfigürasyonları a) Batık MBR, b) Yan akımlı MBR [14]

2.3.1 Batık MBR'ler

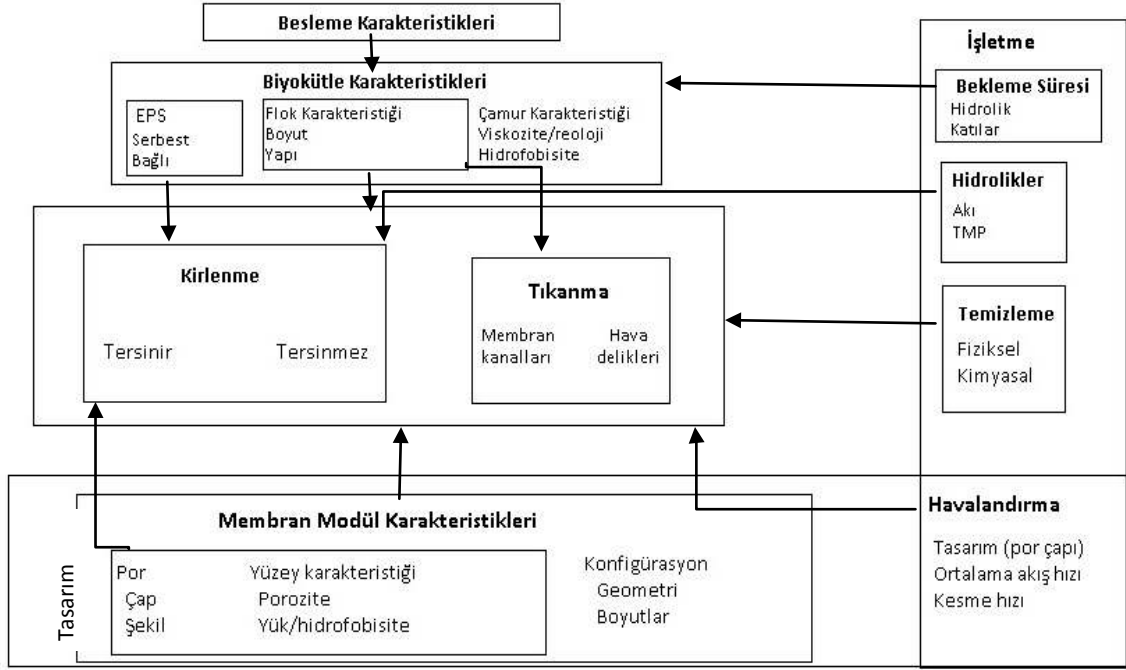
En düşük spesifik enerji ihtiyacından ve geniş çaptaki uygulamalar için en ekonomik olmalarından dolayı, bütün MBR konfigürasyonlarının en yaygın çalışır durumdakilerini batık MBR'ler temsil etmektedir. Batık MBR proseslerinin tasarım ve işletilmeleri için kilit noktası olabilecek gerekli beş temel esas vardır (Şekil 2.2). Bunlar:

- Membranının geçirgenliğini destekleme ve tasarımı,
- Besleme suyunun (atıksu) karakteristiği ve ön arıtması,
- Aktif çamur süspansiyonunun ve membranın havalandırılması,
- Çamur çekme ve kalma süresi,
- Biyokütlenin yapısı ve biyoaktivitesi.



Şekil 2.2 Bir batık MBR'nin esasları [13]

Bu esasların birbiri ile olan ilişkisi özellikle işletmeye bağlı olan üç tanesinin Şekil 2.3'te açıkça gösterilmiştir. Çamur çekmedeki hız, biyokütle konsantrasyonunu belirleyen kalma süresini (çamur yaşı) kontrol etmektedir. MLSS konsantrasyonu, biyoaktivite ve mikrobiyal çeşitliliğin ikisi üzerinde de etkisi vardır. Ayrıca viskozite ve oksijen transferi gibi fiziksel parametrelerin üzerinde de etkisi vardır. Besleme suyu (atıksu) kimyası, üretiminden gelen yapısı nedeniyle çamur süspansiyonunun membranı tıkanma eğilimini belirlediğinden MBR üzerinde en büyük etkiye sahip olmaktadır. Benzer şekilde atıksuyun ön arıtımındaki zorluk tıkanma üzerinde önemli etkiye sahiptir [13].



Şekil 2.3 MBR parametreleri ve kirlenmesinin ilişkisi [13].

Yönetilme sürecindeki prensipler ve karşılıklı ilişkinin yapısı, gerçek işletme durumları ve kesin işletme parametreleri genellikle ancak deneysel olarak yapıldığında belirlenebileceğinden bununla ilgili olarak değerlendirilebilir. MBR tasarımı, işletmesi ve bakımının temelinin anlamada söylenebilecek şey; MBR'deki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olguların geniş kapsamlı kontrolünün sağlama, bu olguların birbirini etkileyerek kirlilik üretmedeki oluşturdukları birtakım mekanizmaları bulmak gerekmektedir [13].

2.4 İşletme Prensipleri

Batık MBR'ler genellikle tıkanma kontrolünün fizibil olduğu düşük diferansiyel basınçta ve kritik süzöntü akısının altında işletilirler. Ayrıca MBR'ler nitrifikasyon ve denitrifikasyonu tamamlamayı sağlamak için de işletilebilir. Aynı anda çöktürmeyle fosfor giderimi de mümkündür. MBR sistemleri işletme parametrelerinin daha esnek kontrolüne izin veren hidrolik bekleme süresi (HRT) ve çamur yaşının (SRT) bağımsız seçimine olanak sağlamaktadır. Biyoreaktördeki yüksek çamur konsantrasyonları yüksek yüklü atıksuyun etkin arıtımına izin vermektedir [14].

- Akı, basınç, direnç ve geçirimsizlik

Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen maddenin miktarıdır. SI birimi olarak $m^3/m^2/sn$ veya basitçe süzüntü veya filtrasyon hızı olarak m/sn ifade edilir. Diğer SI birimi litre-metrkare-saat olarak da (LHM) ifade edilmektedir. MBR'ler genellikle 10-100 LHM akıda işletilmektedir. Akı konvansiyonel MBR'ler için TMP (trans membran basıncı) olan doğrudan sürücü kuvvetle, membran tarafından oluşturulan ve ara yüzeyde buna yakın oluşan toplam hidrolik dirençle alakalıdır.

- Kapalı uç ve çapraz akım işletme

Konvansiyonel basınçlı çalıştırılan sıvı geçiren membran prosesleri iki modun (kapalı uç ve çapraz akış) birinde işletilebilirler. Eğer işletimde sürekli akım yoksa 'kapalı uç-tam akış' olarak adlandırılır. Eğer modül çıkışından sürekli bir akım varsa çapraz akım olarak adlandırılır. Çapraz akış, besleme suyunun membrana doğru tek bir yerden geçerek sadece bir kısmının süzüntüye dönüşmesi olarak adlandırılabilir.

- Tıkanma kontrolü

MBR'lerde diğer membran proseslerinde olduğu gibi akı ile fiziksel ve kimyasal temizleme kuralı, tıkanmanın tamamen durduğu boyutu belirleme arasında denge vardır. Tıkanmayı önleyici iki metot; türbülans artırma ve akıyı düşürme olarak yapılabilir. Yan akışlı MBR'ler için türbülans, basitçe çapraz akış hızı (CFV) artırılarak artırılabilir. Batık MBR'ler için de makul şekilde membran havalandırması artırılarak yapılabilir [13].

2.4.1 Biyolojik arıtma

Biyolojik prosesin en cazip özelliği çok yüksek kimyasal çevrimi verimli şekilde yapabilmesidir. Kimyasal oksidasyon prosesinin aksine, külfetli yan ürün oluşturmada ortam sıcaklığında büyük organik molekülleri CO_2 , H_2O ve inorganik azot ürünleri gibi mineral son ürünlere nicel olarak dönüştürebilmektedir. Aerobik arıtma organik bileşikler (BOD-COD) gidermek ve amonyağı nitrata okside etmek için kullanılmaktadır. Aerobik tanklar biyolojik nütriyent giderimini sağlamak için anoksik ve anaerobik tanklarla birleştirilebilirler.

- Substratın Parçalanması

Reaktöre organik maddenin ilave hızı olan yükleme hızı Monod kinetikleri ile belirlenebilmektedir. Buna göre reaksiyonun hızı; sınırlı substratla maksimum spesifik büyüme hızına ulaştıktan sonra herhangi bir substrat konsantrasyonu artışından etkilenmeyen büyümedir.

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (2.1)$$

μ büyüme hızı (1/saat), μ_m maksimum spesifik büyüme hızı (1/saat)dir. S sınırlı substrat konsantrasyonu ve K_s doygunluk sabiti (g/m^3)dir. Maksimum spesifik substrat kullanım hızı Denklem 2.2'deki gibidir.

$$k = \frac{\mu_m}{Y} \quad (2.2)$$

- Çamur Yaşı ve F/M Oranı

SRT (çamur bekletme süresi) veya çamur yaşı, askıda büyümeli sistemler için kullanılan önemli bir tasarım parametresidir. MBR sistemlerinin avantajı bütün katının membran tarafından tutması nedeniyle bütün kontrol SRT'de olmaktadır.

Yavaş mikrobiyal büyüme hızı, uzun HTR'lere (hidrolik bekleme süresi) dolayısıyla büyük hacimde reaktörlere ihtiyaç duymaktadır. Fakat MBR'lerde biyokütle tank içinde kaldığından dolayı HRT gerektirmeden orantılı şekilde artarak uzun SRT'lere izin vermektedir.

Biyolojik sistemde SRT'yi kontrol etmek; substrat parçalanma hızının kontrolüne, biyokütle konsantrasyonunun ve fazla çamur üretiminin yönetimine olanak vermektedir.

SRT, katıların (çamur) birazı periyodik olarak prosesten ayrılması ile kontrol edilir.

$$\theta_x = \frac{VX}{Q_w X_w + Q_e X_e} \quad (2.3)$$

V ve X havalandırma tankı hacmi (m^3) ve MLSS (g/m^3), Q_w ve X_w atık çamur hızı ($\text{m}^3/\text{gün}$) ve askıda katı konsantrasyonu (g/m^3) ve Q_e ve X_e çıkış için benzer değerlerdir. MBR'lerde membrandan katı geçmediğinden $X_e=0$ olup SRT sadece atık katılarla

tanımlanır. Eğer reaktörden atılan çamur ile reaktördeki çamurun konsantrasyonu aynı ise ($X_w = X$) atılan çamurun hacmi Denklem 2.4'deki gibi olmaktadır [13].

$$Q_w = \frac{V}{\theta_x} \quad (2.4)$$

Aktif çamur proseslerinin (ASP) deneysel tasarım parametresi olan substrat-mikroorganizma oranı (F/M), reaktördeki katı kütlesine kıyasla tanka beslenen substratın hızı (hacimsel beslenen akış hızı $m^3/gün$) olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.5).

$$F/M = \frac{SQ}{VX} \quad (2.5)$$

Evsel atıksu arıtan aktif çamur tesislerinde 0,2-0,4 1/gün F/M değerlerine karşılık çamur yaşının tipik aralığı 5-15 gündür. Çamur yaşı arttığında genellikle MLSS olarak ifade edilen reaktördeki biyokütle konsantrasyonu artmaktadır. Konvansiyonel aktif çamur proseslerinin 8 gün çamur yaşında işletilenleri 2,5 g/L civarında MLSS'e sahipken, 40 gün çamur yaşında işletilenler ise 8-12 g/L MLSS'e sahiptir. MBR'lerde ise çamur yaşı kolayca uzatılabilmekte ve F/M oranı 0,12'nin altında işletilebilmektedir [24][13].

Yüksek MLSS değerleri proses performansı için inert maddelerin birikiminden dolayı zararlıdır ve MLVSS/MLSS oranını azaltmaktadır. Ayrıca yüksek katı miktarı membran kanallarında birikiminden dolayı tıkanma potansiyelini artırmakta ve havalandırma verimini azaltmaktadır.

Aynı HRT ve SRT altında işletilen MBR ile ASP karakteristik ve performans bakımından karşılaştırıldığında; Ghyoot ve Verstraete [25]'nin yaptığı çalışmada çamur veriminin MBR'nin çamur veriminin ASP den daha düşük olduğunu, Smith vd. [26]'in yaptığı çalışmada membran ayırımının en önemli etkisi K_s üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. K_s , substrat affinitesi (ilgisi) ile ters orantılı olup genellikle K_s 'in MBR'de daha düşük değerlerde olması yüksek biyokütle substrat affinitesinin olduğunu ima etmekte ve ayrıca büyüme hızı substrat konsantrasyonundan daha az etkilenmektedir. Smith ve çalışma arkadaşları bunun farklı flok çapları ile ilgili olduğunu ifade etmektedirler. 30 gün çamur yaşında iki biyokütelerin spesifik yüzey alanları MBR için 0,098 m^2/gr , ASP

için 0,0409 m²/gr olması MBR biyokütlesi aynı MLSS konsantrasyonunda yaklaşık 230% daha fazla yüzey alanı sağladığı görülmektedir [13].

2.4.2 Havalandırma

Konvansiyonel aerobik biyolojik atıksu arıtma proseslerinde oksijen genellikle atmosferik havadan hem batık kabarcıklı difüzörlerle hem de yüzeysel havalandırıcılarla sağlanır. Suda oluşturulan kabarcıkların aktif çamur süspansiyonu tarafından kuşatılmasıyla süspansiyona sıvı-hava ara yüzeyiyle oksijen transferi olur. Mikroorganizmaların hayatlarını devam ettirebilmeleri için, BOİ bozunumu için, amonyağın nitrata, nitratın nitrite dönüşümü için oksijen gereksinimi vardır.

Havalandırma ayrıca yüksek kütle transferi sağlamak için ve tankın tamamen karışımı için çalkantı sağlar. Hem biyokütle karakteristiği hem de havalandırma sisteminin tasarımı oksijen transferini etkiler [27]. Biyokütle; oksijen transferini temas alanına ve yüzey enerjisine tümünden etkileyebilecek partiküllerin heterojen karışımından, mikroorganizmalar, kolloidler, organik polimerler, çeşitli boyut ve yüzey özellikte olan katyonlardan oluşmaktadır [13].

Havalandırma ile çeşitli sistem bileşenleri ve parametreleri arasında gelişen ilişki komplekstir ve özellikle batık MBR'ler için havalandırma membranın temizliği için kullanılmaktadır. Bu kompleks ilişki α faktörü ile hesaplanabilir. α faktörü, temiz su ile proses suyu arasındaki kütle transferinin ($k_L a$) farkıdır. Bu faktör havalandırma verimi üzerinde oluşan en önemli dönüşüm faktörüne sahiptir. α faktörü SRT'nin, hava ve sıvı akış hızının ve verilen atıksu için tank geometrisinin bir fonksiyonudur [28][13].

2.5 Avantaj ve Dezavantajları

MBR'ler etkin por çapı 0,1 μ m'nin altında olduğundan oldukça dezenfekte edilmiş ve arıtılmış çıkış suyu üretmektedir. Ayrıca biyokütle konsantrasyonu arttıkça tank boyut gerekliliği küçümekte ve biyolojik arıtmanın etkinliği artmaktadır. Biyokütle çökeltim gerekliliğini kaldırmakta ve çökeltmedeki akış hızından etkilenen çıkış suyu kalitesi MBR'de etkilenmemektedir [13].

2.5.1 Avantajları

MBR'lerin konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre avantajları:

- Daha küçük alan ve daha küçük reaktör hacmi nedeniyle daha yüksek MLSS konsantrasyonuna ve yükleme hızına (çamur yaşını orta dereceye düşürme seçeneği) sahip olması
- Yüksek çamur yaşı için çamur üretimi artışının olması
- Membran filtrasyonunun sonucu olarak daha yüksek kalitede ve daha kalıcı çıkış suyu
- Kirletici piklerine karşı daha düşük hassasiyet (ani yüklemeleri karşılayabilmesi) [14]

2.5.2 Dezavantajları

MBR'lerin konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre dezavantajları:

- Göreceli olarak kurulum ve işletiminin pahalı olması
- Membran izleme ve bakımının sık olması
- Membran toleransına göre sıcaklığa, basınca maruz kalmanın ve pH gereksiniminin sınırlı olması,
- Membranın bazı kimyasallara hassas olabilmesi,
- Yüksek MLSS konsantrasyonlarında düşük verimli oksijen transferinin olması,
- Fazla çamurun arıtılabilirliği [14]

AKTİF ÇAMUR PROSESİ VE AKTİF ÇAMUR RESPIROMETRİSİ

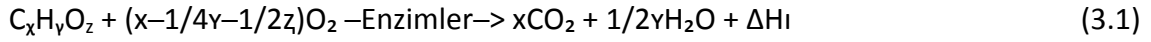
Mikroorganizmaların çeşitli fonksiyonlarını gerçekleştirmedeki hızları; geçiş yollarındaki enzimlerin hızlarına bağlı olan enerji sağlama ve kullanma hızı arasındaki karşılıklı ilişkiye bağlıdır. Biyokimyacılar tarafından yapılan enzimatik reaksiyonların kinetikleri ve hücre içi metabolik kontrollerin etkileri üzerindeki çoğu temel çalışma kompleks olmakta ve bu kompleksliği büyümedeki mekanistik modelin içindeki matematiksel integrasyon önlemektedir. Bu nedenle, mikrobiyal büyümenin kinetiği hakkındaki araştırmalar en çok mikroskobik araştırmalara ve büyüyen kültürlerin deneysel gözlemlerinden geliştirilen eşitliklere dayanmaktadır. Aslında çoğu teknikler, aktif çamurun sahip olduğu enzim kinetiklerindeki esaslar mikrobiyal büyüme kinetiklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır [1].

3.1 Biyokimyasal Oksidasyon

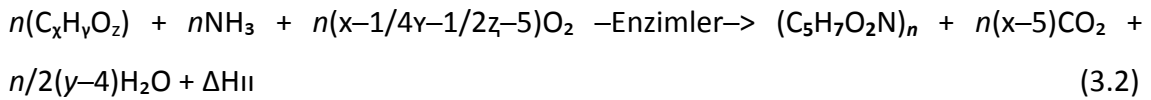
Atıksuyun içindeki organik kısmın aerobik sistemlerle arıtılması oksijenin varlığında heteretrofik organizmaların fizyolojisine bağlıdır. Bu mikroorganizmalar atıksudaki organik maddeleri enerji kaynağı olarak ve hücre sentezi için karbon kaynağı olarak kullanırlar. Diğer heteretroflar oksijen yokluğunda substrat oksidasyonu ve hücre sentezi için oksijeni nitrit ve nitrattan kullanırlar. Aerobik şartlardaki bakteriyel popülasyonlar ayrıca amonyak azotunu nitrat ve nitrit azotuna dönüştürürler. Bu proses nitrifikasyon olarak adlandırılır. Ototroflar bu dönüşüme ayrıca katkıda bulunmaktadır.

Organik atıksuyun aerobik olarak arıtılması kısaca aşağıdaki denklemlerde üç basit stokiyometrik eşitlik; substrat oksidasyonu (Denklem 3.1), hücre sentezi (Denklem 3.2) ve endojen respirasyon (Denklem 3.3) halinde özetlenmiştir.

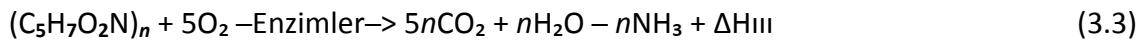
Substrat oksidasyonunun eşitliği:



Bunun sonucu olarak hücre sentezinin eşitliği:



Endojen respirasyon:



Şeklinde ifade edilmektedir. Hücre sentezi ve substrat oksidasyonu için oksijen gereksinimi substrat karakteristiğinin bir işlevidir ama bu stokiyometriye göre hücrelerin solunumu için hesaplanan oksijen eşitlik değeri kg O₂/kg hücredir.

Nitrifikasyon prosesinin ilk fazı:



İkinci fazı:



ΔH_I , ΔH_{II} , ΔH_{III} , ΔH_{IV} ve ΔH_V sistemde üretilen enerjiyi göstermektedir.

Toplam nitrifikasyon:



Nitrifikasyon için oksijen ihtiyacı okside edilen 1 kg NH₃-N için 4.33 kg'dır [1].

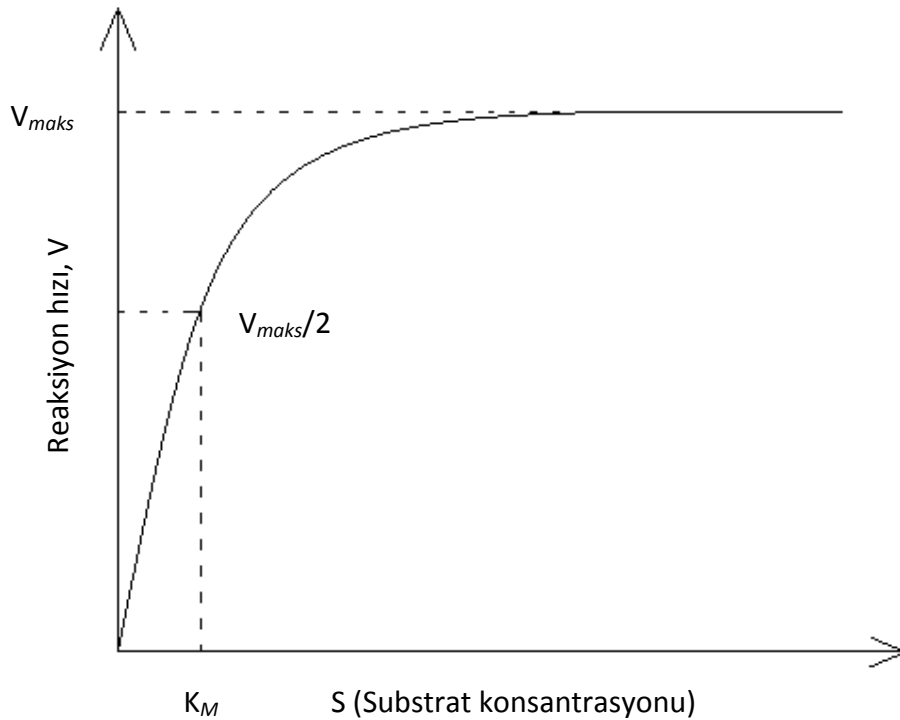
Teorik olarak, çözünmüş oksijen varlığında aktif çamur mikroorganizmaları ile atıksu karşılaştığında, atıksuda bulunan askıda ve kolloidal katılar (çözünmüş organik maddeler) aktif çamur floklarının yüzeyinde adsorblanır. Ayrıca yoğun biyolojik aktivite, atıksu organiklerinin bir kısmını çamurun mikrobiyal hücrelerinde rezerv besine dönüştürür. Bu iki olayın birleşimi aktif çamur prosesinde başlangıç hızlı BOİ giderimini

göstermektedir. Fazla olarak ilave edilen atıksu, sürekli havalandırma ile devamlı olarak giderilir ve bu giderim hızı kalan BOİ'ye ve aktif çamurun konsantrasyonuna bağlıdır [1].

3.2 Enzimler ve Michaelis-Menten Modeli

Enzimler, biyokimyasal sistemlerin katalizörleri olup kimyasal dönüşümlerin şablonunu belirleyen olağanüstü moleküler araçlardır. Onlar ayrıca geniş aralıktaki moleküllerin üzerinde farklı formlarının dönüşümlerine aracılık etmektedir. Enzimler moleküller arası kuvvetlerin tüm kapasitesini kullanarak optimum uyumda substratlarla bir araya gelirler, kimyasal bağları koparmak ve bağ yapmak için başlangıç yaparlar. Esasında enzimler geçiş durumunu stabilize ederek geçiş yollarında en yüksek enerji türünde reaksiyonları katalizlemektedirler.

Bu seçiciliği yaparak bir enzim birkaç tane kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesini sağlamaktadır. Enzimler ayrıca katalitik aktiviteyi düzenlemede ve enerji dönüştürmede moleküler değiştirici olarak rol almaktadır. Aslında, biyolojik sistemdeki çoğu reaksiyonlar enzim yokluğunda fark edilebilir hızda gerçekleşmemektedir [1].



Şekil 3.1 Michaelis-Menten Kinetikleri [1]

Çoğu enzim için kataliz hızı (V) substrat konsantrasyonuna (S) göre Şekil 3.1’de görüldüğü gibi değişir. V , saniyede oluşan ürünün mol sayısıdır. Enzim konsantrasyonu sabit olduğu durumda V , S düşük olduğu zaman S ile doğrusal orantılıdır. Yüksek S ’de V , S ’den neredeyse bağımsız olmaktadır.

$$V = V_{max} \frac{S}{S+K_m} \quad (3.5)$$

Bu eşitlik Şekil 3.1’de verilen kinetik verinin nedenini açıklamaktadır. Çok düşük substrat konsantrasyonunda yani S , K_m ’den çok çok azdır.

$$V = V_{max} \frac{S}{K_m} \quad (3.6)$$

Bu da hızın substrat konsantrasyonuyla doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Yüksek substrat konsantrasyonunda yani S , K_m ’den çok büyüktür $V = V_{max}$; hız maksimumda ve substrat konsantrasyonundan bağımsızdır. $S=K_m$ olduğu zaman $V = V_{max}/2$ ve böylece K_m maksimum reaksiyon hızının yarısındaki substrat konsantrasyonuna eşit olmaktadır [1].

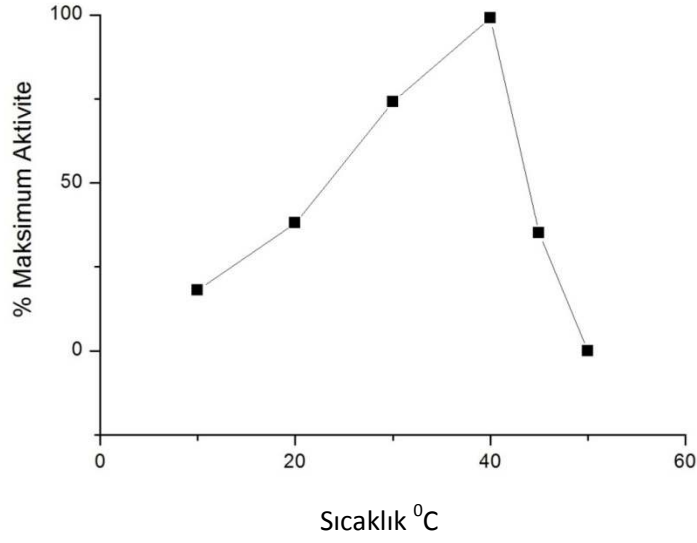
3.3 Biyolojik Prosesleri Etkileyen Faktörler

Bütün biyolojik prosesler çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bunların en önemlileri sıcaklık, pH ve toksisitedir.

3.3.1 Sıcaklık

Atıksuların biyolojik olarak arıtılması üç farklı sıcaklık rejiminde olmaktadır. Bunlardan birincisi mezofilik şartlar, ikincisi termofilik şartlar ve psikrofilik şartlar olarak tanımlanabilir. Sıcaklık bütün biyolojik ve kimyasal reaksiyonları etkilemektedir. Sıcaklıktaki her 10°C’lik artış reaksiyon hızında iki-üç kat artış göstermektedir [1].

Sıcaklık enzimatik reaksiyonların hızını belli bir noktaya kadar artırmaktadır. Bu noktadan sonra sıcaklığın artmasıyla hız azalmaya başlar. Bu nedenle hız belli sıcaklık aralığında maksimum olmaktadır (Şekil 3.2) [10].



Şekil 3.2 Sıcaklığın enzim aktivitesine etkisi [10]

3.3.2 pH

Genellikle spesifik enzimatik prosesle ilgili olan bütün oksidasyon proseslerini pH etkilemektedir. Her bir belirli enzim aktivitesi için spesifik pH aralığı maksimuma yaklaşır ve bu aralıkta aşağı ve yukarı değişir. Çoğu biyooksidasyon sistemleri için oldukça dar bir pH aralığı olmaktadır. Pek çok proses için pH 5 ile 9 aralığı kapsamakta optimum hız pH 6,5-8,5 arasında olmaktadır.

3.3.3 Toksisite

Çoğu maddeler biyolojik oksidasyon prosesler üzerinde toksik etki göstermekte, maddeye ve konsantrasyonuna bağlı olarak kısmen ya da tamamen inhibisyon şeklinde sonuçlanabilmektedir. İnhibisyon ozmotik dengeyi veya enzim sistemlerini engellemeden ileri gelebilir. Bazı durumlarda biyolojik popülasyon toksik maddenin konsantrasyon seviyesine alışabilir. Bu alışma, mikroorganizmaların biyolojik aktivitesi ile toksik maddenin nötralizasyonundan ya da ortamdaki organizmaların kabiliyetli metabolizmaya sahip kültür içinde seçici büyümelerinden kaynaklanabilmektedir [1].

Biyolojik oksidasyon sistemlerindeki toksisite birkaç sebepten kaynaklanabilir. Bunlar:

- Organik maddelerin yüksek konsantrasyonunda toksik olmaları ancak düşük konsantrasyonlarda biyolojik olarak parçalanabilmeleri (fenol, formaldehit vb.)
- İşletme koşullarına bağlı olarak toksik eşiğe sahip maddeler (ağır metaller),
- Yüksek konsantrasyonlarında yavaşlatma gösteren amonyak ve inorganik tuzlar

3.4 Aktif Çamur Prosesi

Atıksu içerisindeki mikroorganizmalar organik maddeyi tüketerek yapı değişimi ve enerji kazanımı gerçekleştirmektedirler. Böylece organik maddeler mikroorganizma bünyesine alınarak aktif çamur şeklinde ortamdan uzaklaştırılır. Sistemden uzaklaştırılan bu çamur biyolojik aktivite gösterdiğinden aktif çamur olarak nitelendirilmektedir [9][11][5].

Biyolojik aktivite gösteren çamur anlamında kullanılan aktif çamurun prosesi, sürekli havalandırmalı bir tank ve tankın çıkışındaki çökeltme havuzundan oluşmaktadır. Çökeltme havuzunda çökelen çamurun bir kısmı tankın girişine geri döndürülür geri kalan kısmı da sistemden uzaklaştırılır. Sistem geri döngülü ve geri döngüsüz olarak çalıştırılabilir. Geri döngülü çalıştırılan sistemler daha verimli olmaktadır [10].

Aktif çamur arıtması halen kullanımda olan ikincil biyolojik atıksu arıtmasının en yaygın formudur. Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımının her ikisi içinde kullanılabilmektedir. 20 binden fazla nüfus için evsel atıksu arıtımında aktif çamur prosesi biyolojik filtrasyon prosesleri ile ekonomik olarak rekabet edebilmektedir. Ayrıca mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetlerini inhibe edecek kimyasallar içermeyen birçok endüstriyel atıksuyun arıtımı için genel geçer bir prosestir [1].

3.4.1 Evsel ve Endüstriyel Atıksular

Atıksular doğal ve yapay kaynaklardan gelmelerine göre farklı maddeler içermeleri sonucu insanlar ve hayvanların kullanımıyla veya çevreye salındığında çok veya az zararlı olabilmektedirler. Atıksuyun kompozisyonu kaynağına ve deşarjından önce arıtılmasına bağlıdır.

Çözünmeyen organikler biyolojik proseslerde biyokütleyle yakalandıktan sonra daha kolay giderilir ve başka türlü indirgenerek ya da fiziksel olarak sudan ayrılmaktadır.

Çözünen organiklerin giderimi, bu bileşikler biyokütle için çabuk kullanışlı olmadığından daha zor olmaktadır. Biyokütlece alınan bu çözünen organiklerin bazı bölümlerinin daha yavaş parçalanıyor olmasına rağmen giderimi göreceli olarak kolaydır. Biyokütlece alınamayan (emilimi olmayan) çözünür organiklerin parçalanamayan kısmı çıkışta kaybedilirken bir bölümü hücre dışı enzimlerin aktivitesi ile parçalanmaktadır [1].

3.5 Atıksu Arıtımında Mikroorganizmaların Rolü

Atıksuda bulunan organik maddenin stabilizasyonu, çözünmüş ve partiküler karbonlu olanların biyolojik olarak giderimi özellikle bakteriler ve mikroorganizmaların belli türleri ile gerçekleştirilmektedir. Atıksu arıtımında en yaygın olarak kullanılması sebebiyle aktif çamur prosesinde mikroorganizmalarının bazı fonksiyonları arıtma verimini etkilemektedir.

Aktif çamur prosesi, aktif çamur maddesinin dört temel üzerindeki fonksiyonuna bağlıdır;

- Atıksudaki organik kirleticilerin adsorpsiyonla giderimi,
- Kolloidal ve küçük partiküler maddenin flokülasyonu,
- Adsorplanan ve floklanan organik maddelerin atık bileşenleri nütriyent kaynağı olarak kullanan çamurdaki mikroorganizmaların faaliyeti sonucu daha basit bileşenlere (su, karbondioksit, amonyak vb.) bozunması
- Aktif çamurun hareketsiz koşullarda sıvı fazdan çökelerek temiz görüntü verebilme durumunun olması ve süpernatant sıvısında bozunabilen çözünmüş ve askıdaki organik maddelerin düşük konsantrasyonda olması [1].

3.6 Havalandırma ve Oksijen Transferi

Havalandırma ünitesinde oksijen varlığında atıksu ve aktif çamur karıştırılmaktadır. Bu da partiküler, kolloidal ve çözünmüş kirliliklerin oksidasyonunu sağlar. Ayrıca yeni mikroorganizmaların gelişmesine destek vermekte ve arıtma prosesinde organik maddelerin sentezi için önemli olmaktadır.

Kirleticiler, çözünmüş oksijenin konsantrasyonuna ve bekleme süresinin uzunluğuna bağlı olarak hem adsorpsiyonla hem de uzun bekleme süresinde oksidasyon ile giderilebilir. Çamur, karışım sıvısından ayrıldıktan sonra çamuru proste tekrar kullanım için havalandırmak gerekmektedir. Konvansiyonel aktif çamur prosesleri daha uzun havalandırma periyotlarına sahip olup genellikle dört ile altı saat sarasındadır ve bu da atıksudaki kirleticilerin adsorpsiyonunu ve oksidasyonunu sağlamaktadır. Havalandırma; biyolojik havalandırma proseslerine oksijen sağlar, atıksudan solventleri sıyrır ve uçucu organikleri örneğin H₂S ve NH₃ gibi gazları gidermektedir [1].

Oksijen transferi; atıksu arıtma proseslerinin önemli bir parçası olup oksijenin gaz fazdan sıvı faza transfer edilmesiyle oluşan bir prosestir. Oksijen transferinin en yaygın uygulaması atıksuyun biyolojik olarak arıtılmasında karşımıza çıkmaktadır. Oksijenin suda düşük çözünürlüğe sahip olması ve suya transferinin düşük hızda olması sonucu havadan suya kazanımı zor olmaktadır. Bu nedenle aerobik atık arıtma sistemlerine yeterli oksijen sağlanmalıdır. Suyu hava veya saf oksijen verilerek suda oluşturulan kabarcıklar aracılığıyla gaz su arayüzeyleri meydana gelir. Bu ara yüzeylerden suya oksijen sağlanmaktadır [12].

3.6.1 Oksijen Transfer Mekanizması

Havalandırma, gaz-sıvı arasında dengesizlik nedeniyle oluşan itici güç olduğunda difüzyon evresinde kütle transfer prosesidir. İtici güç, gaz fazında kısmi basınç gradyanı olup sıvı fazda ise konsantrasyon gradyanıdır. Sıvı fazdaki çözünmüş gazın moleküler difüzyon hızı; sıvı ve gazın karakteristiğine, sıcaklığa, konsantrasyon gradyanına ve difüzyonun olduğu en kesit alanının genişliğine bağlıdır.

Difüzyon prosesi Fick kanunu ile tanımlanabilir.

$$N = -D_L A \frac{dc}{dy} \quad (3.7)$$

N: Birim zamandaki kütle transferi

A: Difüzyonun gerçekleştiği en kesit alanı

dc/dy: En kesit alanına dikey olan konsantrasyon gradyanı

D_L: Difüzyon katsayısı

Eğer ara yüzeyde eşit şartlar olduğu düşünülürse kütle transfer prosesi;

$$N = (-D_g A \frac{dc}{dy})_1 = (-D_L A \frac{dc}{dy})_2 = (-D_e A \frac{dc}{dy})_3 \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

D_g : Gaz filmi boyunca difüzyon katsayısı

D_e : Sıvı içindeki gazın türbülans difüzyon katsayısı

İki film kavramı; kütle transferinin olduğu gaz-sıvı ara yüzeylerdeki durgun filmlerle ilgilidir. Kütle transferi sıvı-gaz filmi ile ilgili olarak Denklem 3.9'daki gibi ifade edilebilir.

$$N = K_L A (C_s - C_L) = K_g A (P_g - P) \quad (3.9)$$

C_s : Oksijen doymunluk konsantrasyonu

C_L : Sıvıdaki oksijenin konsantrasyonu

K_L : D_L / Y_L olarak tanımlanan sıvı film katsayısı

K_g : D_g / Y_g olarak tanımlanan gaz film katsayısı

ve

Y_L : Sıvı film kalınlığı boyunca difüzyon katsayısı

Y_g : Gaz film kalınlığı

Kütle transfer hızını; oksijen ve karbondioksit gibi çözünürlüğü az olan gazlar için sıvı film direnci, çözünürlüğü yüksek olan amonyak gibi gazlar için ise gaz film direnci kontrol eder. Atık arıtmadaki kütle transferi uygulamalarının çoğunu sıvı filmi kontrol eder. Türbülans akış arttığında film kalınlığı azalacaktır ve K_L artacaktır.

Sıvı film kontrol prosesi Denklem 3.10 ile tanımlanabilir.

$$\frac{1}{V} N = \frac{dc}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_L) \quad (3.10)$$

$K_L A / V = K_L a$

$K_L a$ tüm film katsayısıdır ve genellikle kütle transferini hesaplamak için kullanılmaktadır.

Atık arıtmada havalandırmanın en önemli uygulaması biyolojik arıtma proseslerine ve akışların doğal havalandırmasına ve diğer su ortamlarına oksijen transferidir.

Oksijenin suyla temasında denge konsantrasyonu C_s , Henry yasası ile tanımlanabilir.

$$C_s = Hp \quad (3.11)$$

p : Gaz fazdaki oksijenin kısmi basıncı

H : Henry sabiti, sıcaklıkla orantılı ve çözülmüş katıların bulunmasıyla etkilenir

Sıcaklık ve çözülmüş katı konsantrasyonu artarsa Henry sabiti artar dolayısıyla C_s azalır [1].

3.6.2 Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler

Oksijen transferini atıksuyun bileşimi, sıvı sıcaklığı, yüzeysel havalandırma, tank geometrisi ve derinliği, havalandırma tipi, karıştırma hızı ve atmosferik basınç gibi faktörler etkilemektedir.

Suyun bileşimindeki örneğin; çözülmüş tuzlar, partikül maddeler ve yüzey aktif maddeler oksijenin çözünürlüğünü etkilediğinden dolayı transfer hızındaki farklılık için düzeltme faktörü olarak β faktörü kullanılmaktadır [12].

$$\beta = \frac{C_s(atıksu)}{C_s(temiz su)}$$

Karıştırma hızının, tank geometrisinin ve toplam çözülmüş katı konsantrasyonunun (TDS) oksijen transfer hızına etkisi nedeniyle oksijen transfer katsayısını gerçek sistemde tahmin etmek için α düzeltme faktörü kullanılmaktadır [12].

$$\alpha = \frac{K_L a(atıksu)}{K_L a(temiz su)}$$

Biyolojik proseslerde transfer hızını etkileyen maddelerin gideriminden dolayı biyooksidasyon boyunca α faktörünün artması veya azalması beklenmektedir [1].

Sıvı sıcaklığının etkisi olarak; sıcaklık arttıkça sıvı film sabiti (K_L) artar. Ayrıca sıcaklığın istemde üretilen hava kabarcıklarının boyutu üzerinde de etkisi vardır. Sıcaklığın oksijen transfer katsayısına etkisi Denklem (3.12) ile gösterilmiştir [1].

$$K_L a(T) = K_L a(20^\circ\text{C}) \theta^{(T-20)} \quad (3.12)$$

Tipik θ değerleri 1.015 ile 1.040 arasında değişmekte olup mekanik difüzyon ve havalandırma aygıtları için değeri 1.024 dır [12].

3.6.3 Oksijen Transferinin Ölçümü

Havalandırma sistemlerinde oksijen transfer hızının tahmini, genellikle bir oksijen hız modeline bağlıdır. Tüm oksijen transfer katsayısı $K_L a$ genellikle test ile veya tam ölçüm araçları ile belirlenmektedir. Aktif çamur sisteminde tüm oksijen transfer katsayısı $K_L a$ mikroorganizmalar tarafından tüketilen oksijen de dikkate alınarak hesaplanabilir. $K_L a$ ayrıca sıcaklığın, karıştırma yoğunluğunun ve atıksudaki bileşenlerin bir işlevidir [12].

Aktif çamurun havalandırmasında çamur sıvı karışımının oksijen kullanma hızı dikkate alındığında oksijen transfer hızı Denklem 3.13'deki gibi olmaktadır.

$$\frac{dc}{dt} = K_L a(C_s - C_L) - r_s \quad (3.13)$$

r_s ; endojen oksijen kullanım hızı (mg/L.dk)

Kararlı halde $dc/dt = 0$ olup $K_L a$ Denklem 3.14'den hesaplanabilir.

$$K_L a = \frac{r_s}{(C_s - C_L)} \quad (3.14)$$

Ancak bu metotta Denklem 3.13'deki C_s ve C_L sıcaklık ve basınç gibi faktörlerden etkilendiğinden dolayı belirlemek zor olacağından çok güvenilir değildir. Ölçümler dinamik koşullarda yapıldığında sistemin önce çözünmüş oksijeni düşürülüp (N_2 gazı, Na_2SO_4 veya çamurun kendi solunumu ile) çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0,5 mg/L'ye kadar düştükten sonra sistem yeniden havalandırılır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişim kaydedilerek zamana karşı grafiği elde edilir. En az 10 ölçüm alınarak zamana karşı (dk) çizilen eğrinin lineer kısmından tüm oksijen transfer katsayısı $K_L a'$ yı Denklem 3.14'den hesaplamak mümkündür.

$$K_L a = \frac{\ln \frac{(C_e - C_1)}{(C_e - C_2)}}{(t_2 - t_1)} \quad (3.14)$$

Ölçümde etkili olan çamurun respirasyonu (r_s) ölçüm boyunca hemen hemen sabit alınabilir. $K_L a$ gaz akışına, kabarcık çapına, reaktör boyutlarına, aktif çamurun karışım

hızına, sıcaklığa ve hava basıncına bağlıdır. Respirimetrik parametreleri değerlendirmek için $K_L a$ önemli bir parametredir [1].

3.7 Aktif Çamur Respirimetrisi

Aktif çamurun endojen oksijen kullanım hızını veya substrat (atıksu) kullanımı olan eksojen oksijen kullanım hızını belirlemek için oluşturulan sistemlere 'respirometri' denmektedir. Aktif çamurun respirometrik ölçümleri, sistemdeki çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimlerin ölçümüne bağlıdır. Respirimetri su kirliliği araştırmalarında araştırmacılar için kullanışlı bir yöntem olmuştur. Çoğu respirometreler BOİ belirlemek için geliştirilmiştir. Zamanla farklı respirometreler atıksuyu, aktif çamuru ve aktif çamur süspansiyonunda atıksu bileşenlerinin biyodegradasyon kinetiklerinin analiz ve ölçümü için kullanılmıştır [1].

Respirometrik ölçümler kapalı sistemlerde, respirometrik donanımının bir çeşidiyle veya açık respirometrimelerde yapılabilmektedir. Genel olarak respirometreler iki gruba ayrılır;

- Kapalı Respirometreler
 - Manometrik Respirometreler
 - Volumetrik Respirometreler
 - Birleşik Respirometrelerojiler
- Açık Respirometreler
 - Kesintili Respirometreler
 - Sürekli Respirometreler

Manometrik respirometreler, sabit hacimdeki sistemde tüketilen oksijen kadar değişen basınç farklılığını ölçmektedir. Volumetrik respirometreler sabit basınçta çalışarak elektrolitik hücrede tüketilen oksijeni hesaplar. Birleşik respirometreler ise sistemde farklı hacim ve basınçlarda basınçtaki değişimleri ölçer. Bütün respirometreler aktif çamur süspansiyonu içindeki atıksuyun veya substratın biyodegradasyonunu yaklaşık olarak ölçebilmektedir.

3.7.1 Winkler Şişesi Metodu

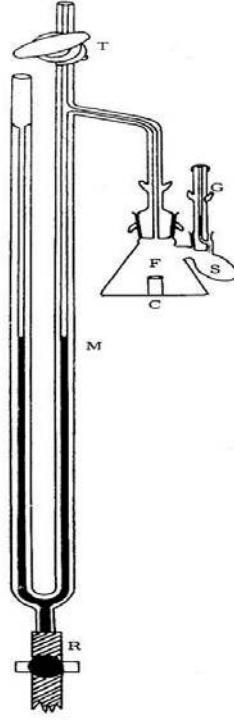
Oksijen tüketim hızı, oksijen seçici elektrotla bilinen hacimde çözülmüş oksijen konsantrasyonu ölçülerek belirlenebilir. Sıcaklığını sabit tutacak su ceketine sahip şişeye aktif çamur süspansiyonu konulup ağzı kapalı şekilde manyetik karıştırıcı ile karıştırılır ve elektrot ile çözülmüş oksijen ölçülmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Winkler Şişesi

3.7.2 Wargburg Metodu

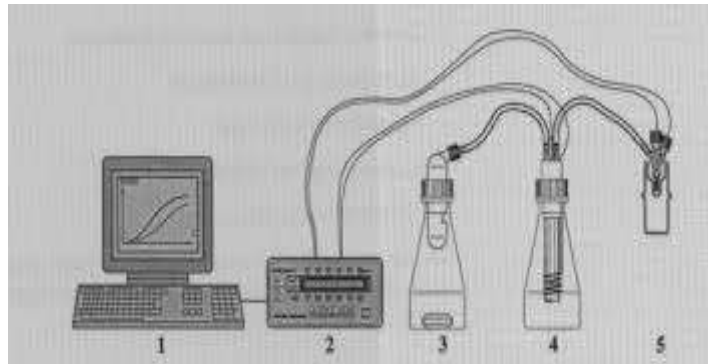
Manometrik prensibe dayanan bu metot, atmosfere kapalı sistemde sabit sıcaklıkta atıksu numunesindeki solunum için kullanılan oksijeni ölçülmektedir. Zamanla kullanılan oksijen, sabit hacimdeki sistemin basıncındaki azalma kaydedilerek belirlenir. Oluşan karbondioksit KOH çözeltisi ile absorbe edilerek basınçta azalma meydana gelir ve sadece oksijen tüketimi ölçülmüş olmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Warburg Respirometrisi

3.7.3 Sapromat Metodu

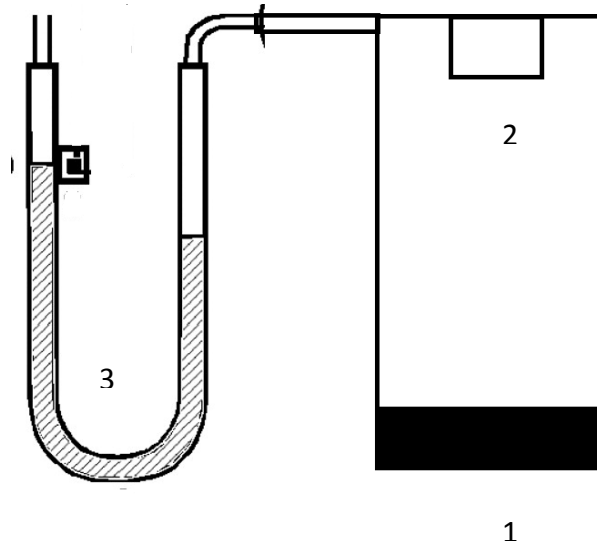
Sapromat metodu volumetrik metot olarak geliştirilmiştir ve birkaç ölçme elemanlarıyla termostat üzerine kurulmuştur. Ölçüm için gerekli numune hacmi 250 ml ile 1000 ml arasında olmaktadır. Oksijenin tüketilmesi ile oluşan CO_2 , elektrolitik hücreye bağlı ayrı bir Sapromat hücresinde alkalın çözeltisiyle (soda kireç) adsorbe edilir. Saf oksijenin tüketimi ile sistemdeki iç basınç azalımı otomatik olarak kaydedilmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Sapromat Respirometrisi 1:Bilgisayar, 2: Kayıt cihazı 3:Numune şişesi 4: Basınç şişesi 5: Oksijen şişesi

3.7.4 Hatch respirometrisi

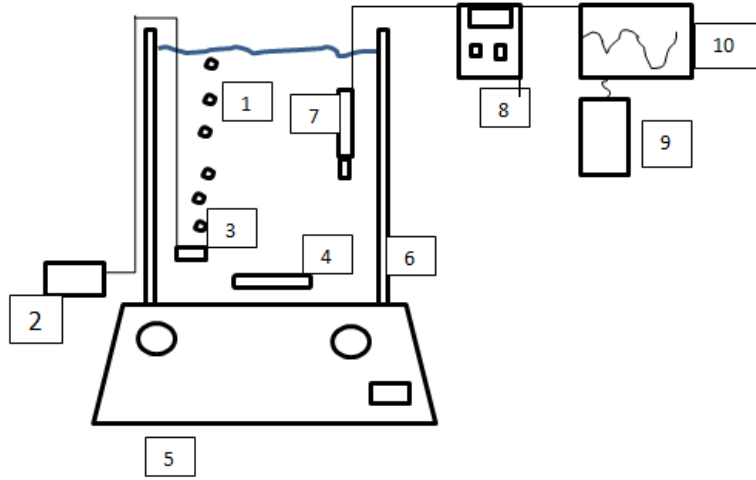
Hatch respirometrisi, kapalı uçlu civa manometrisine aparatlarla bağlı bir şişe içerisine konulmuş aktif çamur numunesindeki substratın biyodegradasyonu için tüketilen oksijenin ölçümüne dayanmaktadır. Bu sistemde saf oksijen yerine hava kullanılmakta ve oluşan karbondioksit KOH solüsyonu ile adsorbe edilerek kullanılan oksijen kadar hava numune şişesine dolmaktadır. Manometredeki civanın hareketiyle basınç düşüşü direk olarak mg/L O₂ olarak okunmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Hatch Respirometrisi 1: Numune, 2: KOH, 3: Civa manometrisi

3.7.5 Açık Respirometri

Açık respirometri, termostatlı veya sıcaklığı sabit tutulacak şekilde ayarlanmış bir hücreye aktif çamur süspansiyonu konularak akvaryum pompası ile havalandırılır ve manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaktadır. Aktif çamurun aktivitesine bağlı olarak değişen çözünmüş oksijen konsantrasyonu oksijen probu, oksijen ölçer, bilgisayar ve kayıt programı yardımı ile çözünmüş oksijen değerleri kaydedilmektedir (Şekil 3.7). Elde edilen değerlerden çizilen grafikler yardımı ile respirometrik olarak BOİ, aktif çamurun kinetik ve stokiyometrik katsayıları hesaplanabilmektedir. Ayrıca laboratuvar ölçekli aktif çamur arıtma tesisleri de açık respirometri örneği olarak söylenebilir.

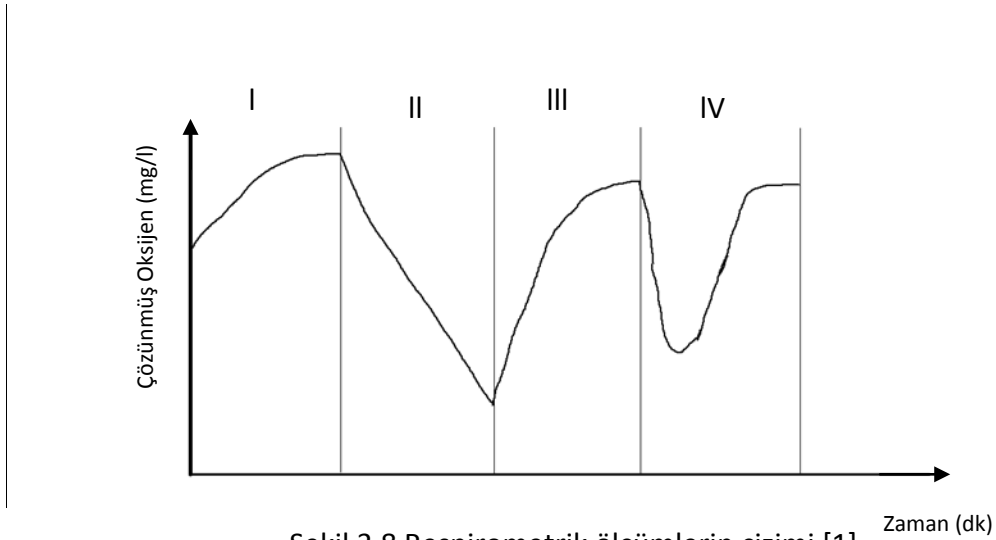


Şekil 3.7 Açık Respirometri Örneği [1]

(1) Reaktör (2) Akvaryum pompası (3) Difüzör taşı (4) Magnet (5) Manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı (6) Isı ceket (7) Oksijen probu (8) Oksijen ölçer (9) Bilgisayar (10) Ekran ve kayıt programı

3.8 Respirometrik Ölçümler

Açık respirometride yapılacak ölçümler sonucu aktif çamur süspansiyonunun performansına göre elde edilebilecek grafikler dört faz halinde Şekil 3.8'deki gibi olmaktadır. Bu grafikler yardımı ile kinetik ve stokiyometrik katsayılar belirlenebilir. Bu veriler ile biyolojik arıtma tesislerinin kontrolü ve boyutlandırması ve atıksuyun karakterizasyonu sağlanabilir [4].



Şekil 3.8 Respirometrik ölçümlerin çizimi [1]

Birinci faz: Aktif çamur süspansiyonunun doygunluğu

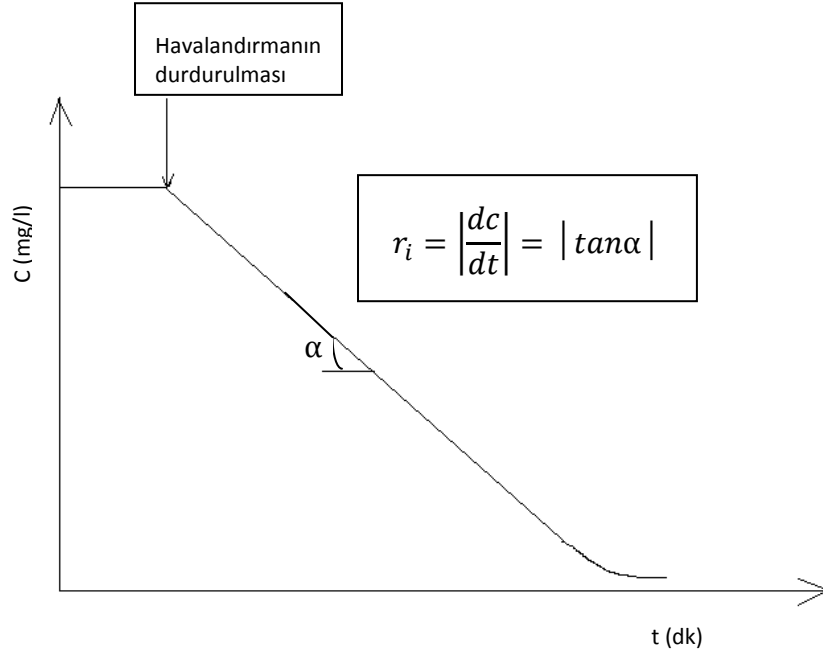
Açık respirometriye alınan aktif çamur sistemdeki substrat tüketilene kadar havalandırılır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu sabitlendiğinde oksijen kullanım hızı endojen faza ulaşmış olmaktadır. Böylece respirometrideki aktif çamur ölçümleri için hazır duruma gelmiş olur. Aslında gerçek kararlı hal asla endojen respirasyona ulaşmamakta ama hücrelerin endojen bozunmasından dolayı sabit olarak azalmaktadır [4].

İkinci Faz: Endojen oksijen kullanım hızının belirlenmesi

Aktif çamur süspansiyonuna substrat eklenmediğinde endojen oksijen kullanım hızı sabit bir değere sahiptir.

$$\left| \frac{dC}{dt} \right| = r_i = K_L a (C_s - C_e) = \text{sabit} \quad (3.15)$$

Çamur süspansiyonu endojen faza ulaştıktan sonra (C_e), eğer hava pompası durdurulursa endojen oksijen kullanım hızı belirlenebilir. Zamanla değişen çözünmüş oksijen konsantrasyonları kaydedildiğinde elde edilen grafik Şekil 3.9'daki gibi olur.



Şekil 3.9 Endojen oksijen kullanım hızı [4]

$$r_i = \left| \frac{dc}{dt} \right| (mg/L.saat) \quad (3.16)$$

veya

$$R_i = \frac{r_i}{X_v} (g/g.saat) \quad (3.17)$$

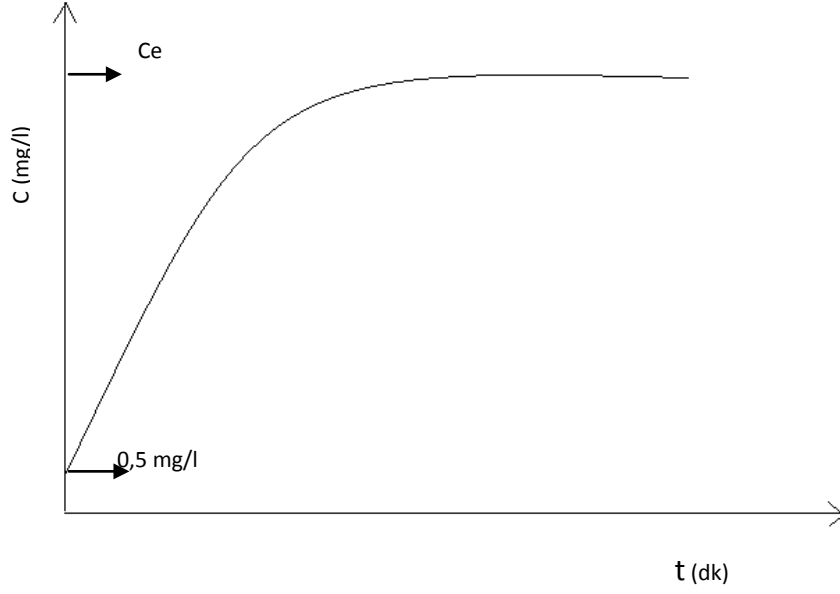
Denklem 3.16 kullanılarak zamana karşı çözünmüş oksijen eğrisinin lineer kısmından endojen oksijen kullanım hızı hesaplanabilir.

Üçüncü Faz: Tüm oksijen transfer katsayısının hesabı ($K_L a$)

Aktif çamur süspansiyonuna belli miktarda substrat eklendiğinde tüketilen oksijen miktarını hesaplamak için $K_L a$ 'nın bilinmesi gerekmektedir.

Endojen safhada olan reaktörün havası kesildikten sonra, reaktör çeşitli yöntemlerle oksijeni giderilerek veya havalandırılmadan belirli bir zaman sonra çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0,5 mg/L'nin altına düşürülüp sistem tekrar havalandırılır.

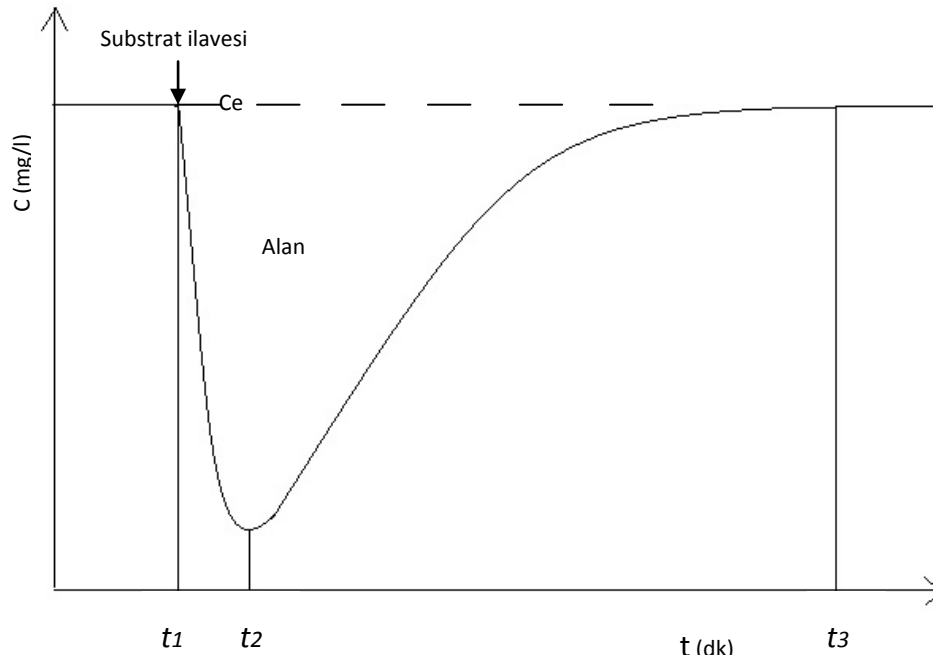
Çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişim kaydedilerek zamana karşı grafiği çizilir (Şekil 3.10). Elde edilen değerlerden veya grafiğin ilk bölümünden tüm oksijen transfer katsayısının hesabı yapılabilmektedir [4].



Şekil 3.10 Tüm oksijen transfer hızı

Dördüncü Faz: Respirogramın değerlendirilmesi

$K_L a'$ sı ve r_i' si belirlenen aktif çamur süspansiyonu tekrar endojen faza geçirilir. Sisteme kazandırılan oksijen ile aktif çamurun kendi tükettiği oksijen arasında eşitlik oluştuktan sonra çözünmüş oksijen konsantrasyonu doyumluğa (C_e) ulaşır. Süspansiyona belli miktarda atıksu (substrat) ilave edildiğinde substrat solunumundan (eksojen oksijen tüketimi=atıksuyun parçalanması için tüketilen oksijen) dolayı çözünmüş oksijen konsantrasyonu (C_e) düşer. Sisteme ilave edilen substrat nedeniyle çözünmüş oksijendeki değişimler kaydedildiğinde elde edilen grafik respirogram olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.11) [4].



Şekil 3.11 Respirogram [4]

Sabit sıcaklık, basınç ve hava debisinde endojen safhada çamur solunum hızı ya da endojen oksijen kullanım hızı (r_s veya r_i) sabittir (Denklem 3.15).

$$r_i = K_L a(C_s - C_e) = \text{sabit}$$

Sisteme substrat ilave edildiğinde eşitlik bozularak sistem eksojen oksijen kullanımına geçer ve çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişim Denklem 3.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) - r_t \quad (3.18)$$

$$r_t = r_i + r_e \quad (3.19)$$

r_t : toplam oksijen kullanım hızı (mg/l.dk)

r_i : çamur solunum hızı (endojen oksijen kullanım hızı) (mg/l.dk)

r_e : substrat oksijen kullanım hızı (eksojen oksijen kullanım hızı) (mg/l.dk)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) - K_L a(C_s - C_e) - r_e \quad (3.20)$$

$$r_e = K_L a(C_e - C) - \frac{dC}{dt} \quad (3.21)$$

Şekil 3.11'deki respirogramda görüldüğü üzere çözünmüş oksijen konsantrasyonunun en düşük olduğu noktada (t_2 zamanı) $\frac{dC}{dt} = 0$ ' dır. Böylece Denklem 3.21, Denklem 3.22'teki gibi ifade edilebilir.

$$r_e = K_L a (C_e - C_{min}) \quad (3.22)$$

3.9 Açık Respirometri ile Kinetik ve Stokiyometrik Parametrelerin Belirlenmesi

Sabit sıcaklık, basınç ve hava debisinde aerobik biyolojik arıtma sistemlerindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu direkt aktif çamurun aktivitesi ile ilgilidir. Sistemdeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu takip edilerek sistemin performansı belirlenebilir. Endojen fazda olan aktif çamur süspansiyonuna substrat ilave edildiğinde Şekil 3.11'deki respirogram elde edilecektir. Bu respirogram yardımı ile sisteme ait $K_L a$ değeri de kullanılarak sistemin genel bir değerlendirmesinin yapılabileceği gerekli kinetik parametreler hesaplanabilmektedir [4].

3.10 Oksijen Transfer Katsayısının ($K_L a$) Belirlenmesi

Açık respirometride belli miktarda eklenecek atıksu için aktif çamur tarafından tüketilen oksijenin miktarını hesaplamak için respirometredaki $K_L a$ parametresinin bilinmesi gerekmektedir.

Tüm oksijen transfer katsayısı $K_L a$, respirometrik ölçümler sonucu hesaplanacak parametreler için gereklidir.

Hava fazından su fazına oksijen transferi Denklem 3.23'de ifade edilebilir.

$$\frac{dC}{dt} = a K_L a (\beta C_s - C) \quad (3.23)$$

Aktif çamur süspansiyonu için;

$$\frac{dC}{dt} = a K_L a (\beta C_s - C) - r_t \quad (3.24)$$

r_t ; sisteme atıksu ilave edildiğinde aktif çamur süspansiyonunun toplam respirasyon hızı a ve β faktörleri arıtma boyunca sabit olarak alınabilir [4].

Sistemde aktif çamur süspansiyonu endojen solunumdayken sisteme kazandırılan ve sistemde kullanılan oksijen eşit olduğunda $K_L a$ Denklem 3.13'ten hesaplanabilir. Ayrıca

aktif çamur süspansiyonu yine endojen safhadayken sistem oksijensizleştirilip çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0,5 mg/L'ye gelir gelmez tekrar havalandırılıp çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişim kaydedilerek eğri oluşturulur. Eğrinin eğiminden Denklem 3.14 yardımıyla oksijen transfer katsayısı hesaplanabilmektedir.

Ölçüm boyunca çamur endojen solunumu sabittir. $K_L a$ ölçümü boyunca sisteme verilen hava debisi, karıştırma hızı, sıcaklık hava basıncı sabit olmalı ve kullanılan difüzör, reaktör hacmi ve şekli aynı olmalıdır [4].

3.11 μ ve μ_{max} 'ın Belirlenmesi

Mikrobiyal büyüme kinetiği, atıksu arıtımı için kullanılan biyolojik proseslerin performansı mikrobiyal büyümenin ve substrat kullanımının dinamiklerine bağlıdır. Mikrobiyal büyüme kinetiklerini, reaktördeki toplam askıda katı madde konsantrasyonuna bağlı olan biyokütle üretimi ve substrat kullanımı kontrol etmektedir [11].

Monod' a göre mikroorganizmaların büyüme hızı;

$$\mu = \frac{dX}{dt} \frac{1}{X} = \mu_{max} \frac{S}{K_m + S} \quad (3.25)$$

dır. Hücre büyümesi ile substrat kullanımı ve oksidasyonu ve dönüşüm faktörü arasında ilişki;

$$\frac{dX}{dt} = y \frac{dS}{dt} \quad (3.26)$$

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{1-y}{y} \frac{dX}{dt} \quad (3.27)$$

$$\frac{dO_2}{dt} = (1 - y) \frac{dS}{dt} \quad (3.28)$$

gibidir. Aktif çamur süspansiyonu endojen solunuma geçtikten sonra reaktördeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu sabittir (Denklem 3.22). Substrat eklendiğinde oksijen konsantrasyonu düşer ve respirogram (Şekil 3.11) elde edilir. Toplam respirasyon hızı ve substrat solunum hızı Denklem 3.10 ve 3.11'deki gibi olur. Belirli S/X (substrat/mikroorganizma) oranının üzerinde maksimum büyümenin bir periyodu vardır. Maksimum büyüme hızının büyüklüğü X (mikroorganizma konsantrasyonu)'na bağlıdır. Teorik olarak maksimum büyüme hızının periyodunda Denklem 3.29 geçerlidir [2].

$$R_e = \mu_{max} X \left(\frac{1-y}{y} \right) \quad (3.29)$$

ve $\mu_{max} = \frac{dR_e}{dt} / R_e$ dir. Bununla birlikte dR_e/dt genellikle küçüktür ve μ_{max} başka zorluklar nedeniyle respirogramlarla tam olarak belirlenemeyebilir [2].

Mikroorganizmaların büyümesini tanımlamak için Denklem 3.25, 3.30, 3.31 kullanılabilir.

$$\frac{dX}{dt} = -y \frac{dS}{dt} \quad (3.30)$$

$$R_e = -(1-y) \frac{dS}{dt} \quad (3.31)$$

Bu ilişkilerin temeli üzerinde hücre büyümesini tanımlamak için oksijen tüketim verisi kullanılabilir.

$$\mu = \frac{(1-y/y)(dX/dt)}{(1-y/y)X_t} = \frac{R_e}{\int_0^t R_e dt} = \mu_{max} \frac{dBOD/dt}{BOD_t} \quad (3.32)$$

Açık respirometri yardımıyla R_e (eksojen solunum hızı $\text{mgO}_2/\text{l.dk}$) ve S (substrat) arasındaki ilişki bulunabilir. Bu durumda substrat eklendikten sonra en yüksek eksojen respirasyon hızını bulmak mümkündür. Çoğu pratikte respirogramın en uç noktasındaki (substrat ilavesi ile çözünmüş oksijenin en düşük olduğu nokta) ilişki;

$$\frac{dC}{dt} = 0$$

$$R_e = \frac{1-y}{y} \frac{dX}{dt} = K_L a (C_e - C) \quad (3.33)$$

dir. S' 'ye karşı dX/dt karşılıklı çizilebilir (Denklem 3.28). Apsisi dik kesen $-1/K_m$ ve ordinatı kesen de $1/\mu_{max} X$ tir. Hücre büyümesi ile aktif biyokütle konsantrasyonu arasında göreceli olarak küçük bir ilişki vardır ve bu konsantrasyon ölçümler boyunca sabit olarak kabul edilebilir. Böylece sistemden y , μ_{max} , ve K_m belirlenebilmektedir [2].

Denklem 3.28 ve 3.32 kullanılarak çoğalma hızı;

$$\frac{dX}{dt} = X\mu = \frac{R_e y}{1-y} \quad (3.34)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

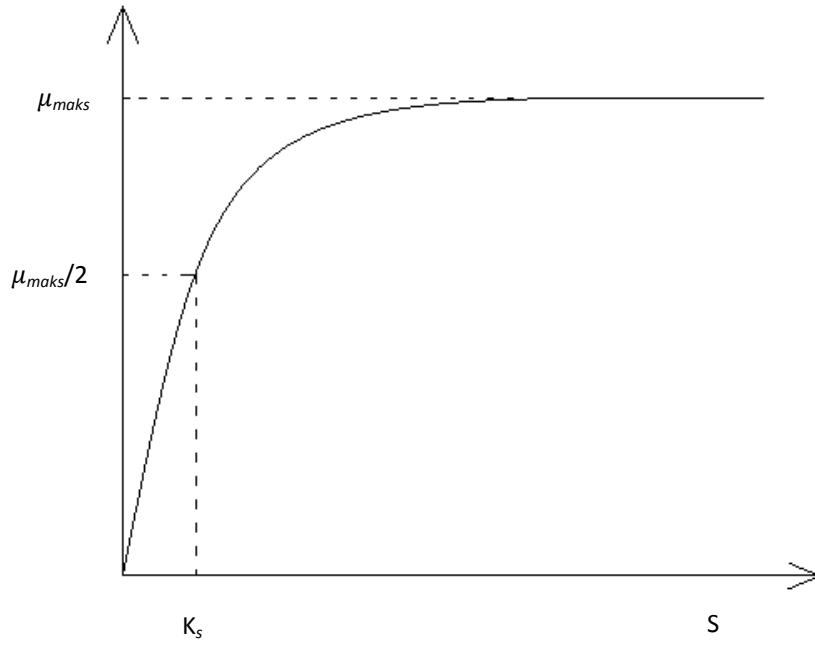
Reaktöre belirli miktarda substrat ilave edildiğinde belirli konsantrasyondaki mikroorganizmanın çoğalma hızı substrat sınırlamasından dolayı belli hızda olmaktadır.

Ancak yeterli miktarda substrat ilave edildiğinde çoğalma hızı maksimuma ulaşacaktır. Ortamda yeterli ve daha fazla substrat olduğunda belli konsantrasyondaki mikroorganizmaların sabit sıcaklık ve belli aralıktaki pH' da enzim aktivitesi maksimuma ulaşır sabit olacağından solunum hızı, substrat kullanım hızı ve çoğalma hızı maksimumda olacaktır. Bu nedenle mikroorganizma konsantrasyonu sabit tutularak farklı hacimlerde substrat ilavesi yapıldığında Şekil 3.11'teki respirogramdan Denklem 3.21 gereği farklı r_e (R_e) değerleri elde edilebilmektedir.

Yeterli sayıda deneme yapılarak artan miktarda substrat ilavesi yapıldığında r_e (R_e) (eksojen solunum hızı) maksimuma ulaşmaktadır. Eksojen solunum hızı (r_e), maksimuma ulaştıktan sonra ilave edilen substrat miktarının artırılmasına rağmen sabit bir değerde kalmaktadır. Elde edilen r_e değerlerinin sistemdeki ortalama mikroorganizma konsantrasyonuna bölünmesiyle spesifik substrat solunum hızı R_{e_s} değeri elde edilebilmektedir [6].

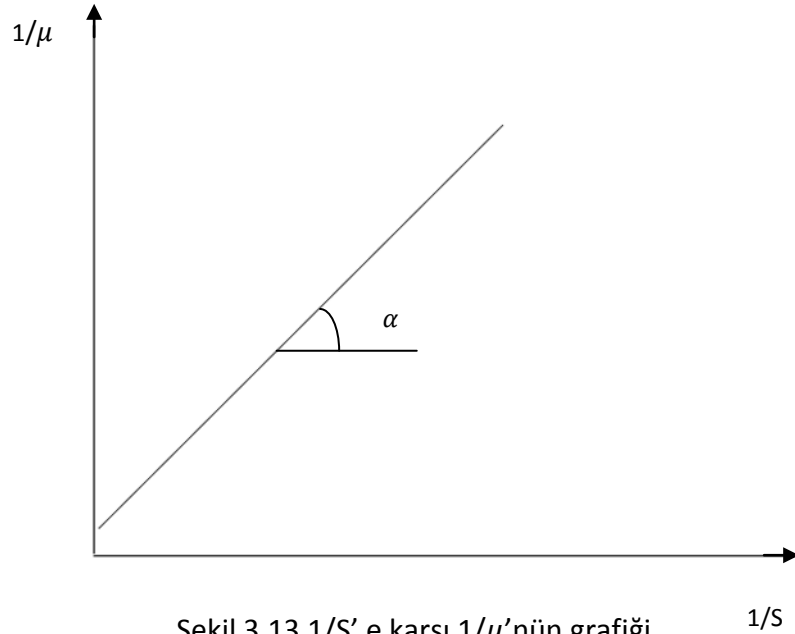
3.12 K_s Parametresinin Belirlenmesi

Monod denklemine göre K_s (yarı hız sabiti) parametresi, maksimum spesifik çoğalma hızının yarısındaki substrat konsantrasyonunu ifade etmektedir. Spesifik büyüme hızı (μ) maksimumun yarısında $\frac{\mu_{max}}{2}$ olduğu zaman S 'nin değeri K_s 'ye eşit olmaktadır. Monod denklemine göre substrat konsantrasyonuna karşılık spesifik büyüme hızının grafiği Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Substrat konsantrasyonuna göre spesifik büyüme hızı [7]

Monod denklemi kullanılarak Şekil 3.12'deki substrat konsantrasyonuna göre spesifik büyüme hızı grafiği lineerleştirilerek $1/S$ 'ye karşı $1/\mu$ 'nün grafiği çizildiğinde Şekil 3.13'deki grafik elde edilebilmektedir.



Şekil 3.13 $1/S$ ' e karşı $1/\mu$ 'nün grafiği

Şekil 3.13'deki grafiğin eğiminden K_s değeri bulunabilir.

3.13 k_d Parametresinin Belirlenmesi

Biyolojik sistemlerde tüketilen besin miktarı ile üretilen mikroorganizma miktarı arasındaki bağıntı da dikkate alınması gereken iç solunum, ölüm ve çeşitli türlerin birbirini tüketmesi gibi faktörler vardır. Bu faktörlerin hepsini ifade etmek için; hücre miktarında bu faktörlerden dolayı meydana gelen azalma mevcut mikroorganizma konsantrasyonu ile orantılı olduğu kabul edilir ve literatürde endojen ayrışma olarak tanımlanmaktadır [11].

$$r_d = -k_d X \quad (3.35)$$

r_d : Endojen ayrışma (içsel solunum) hızı (mg/L.t)

k_d : Endojen ayrışma katsayısı (t^{-1})

X: Mikroorganizma konsantrasyonu (mg/L)

Reaktördeki aktif çamur süspansiyonu endojen safhaya getirildiğinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu belli değerde sabit kalmaktadır. Endojen safhadaki aktif çamurun havalandırılması durdurulduğunda çözünmüş oksijen konsantrasyonu yukardaki respirometrik ölçümler kısmındaki II. fazda oluşan Şekil 3.13'deki endojen solunum hızı elde edilir. Grafiğin lineer kısmının eğiminden yararlanılarak çamur solunum hızı ($r_s=r_i$) bulunabilir (Denklem 3.36). Denklem 3.37 yardımıyla da spesifik endojen solunum hızı ($R_s=k_d$) (endojen ayrışma katsayısı) hesaplanabilmektedir.

$$r_s = r_i = \left| \frac{dC}{dt} \right| \text{ (mg/l.dk)} \quad (3.36)$$

$$R_s = \frac{1,44 \cdot r_s}{X} \text{ (t}^{-1}\text{)} \quad (3.37)$$

r_s : çamur solunum hızı (mg/l.dk)

$R_s = k_d$ Spesifik endojen solunum hızı (endojen ayrışma katsayısı) (t^{-1})

3.14 Y Parametresinin Belirlenmesi

Biyolojik arıtma proseslerinde organik veya inorganik bileşiklerin biyolojik oksidasyonu eş zamanlı olarak hücre büyümesi meydana gelmektedir. Üretilen biyokütle miktarının tüketilen substrat miktarına oranı (gr biyokütle/gr substrat) biyokütle verimi (Y) olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{Biyokütle verimi } Y = \frac{\text{gr üretilen biyokütle}}{\text{gr kullanılan veya tüketilen substrat}}$$

Biyokütle verimi, tüketilen tüm organik bileşiği ölçülebilen parametreleri örneğin KOİ veya BOİ olarak yansıtmaya bağlıdır. Böylece verim gr biyokütle/ gr giderilen KOİ veya gr biyokütle/ gr giderilen BOİ olmaktadır [12].

Respirometrik olarak biyokütle veriminin belirlenmesinde kullanılan yöntem $Y = 1 - \frac{\text{substratın kullanılması için tüketilen oksijen}}{\text{kullanılan substrat miktarı}}$ prensibine dayanmaktadır.

Reaktöre ilave edilen belli miktardaki substrat sonrası çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki meydana gelen değişimin kaydedilmesiyle elde edilen Şekil 3.11'deki respirogramın alanı (O_r) kullanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanabilmektedir [2].

$$\int_0^{\infty} R_e dt = K_L a \cdot O_r = (1 - Y)S \quad (3.38)$$

O_r : Şekil 4.5'teki respirogramın alanı

Ros [1]'un kullandığı yöntem de aynı şeyi ifade etmekte olup respirogramın alanını eklenen atıksu (substrat)'ın parçalanması için kullanılan oksijenin miktarı olarak belirtmekte ve bunu (STBOD) kısa süreli BOİ olarak da tanımlamaktadır.

$$\int_{t_1}^{t_3} r_e dt = K_L a \cdot F = STBOD \quad (3.39)$$

$$Y = 1 - \frac{K_L a \cdot F}{S} \quad (3.40)$$

F: Respirogramın alanı

S: Substrat konsantrasyonu

Respirogram (Şekil 3.11) t_1 ve t_3 arasındaki zamanda eklenen substratın tamamının kullanıldığını göstermektedir [1].

Ayrıca Rodriguez vd.[20] ve Helle [21] eklenen substratın tamamı kullanıldığında;

$$Y = \frac{S_0 - OC}{S_0} = 1 - \left(\frac{OC}{S_0}\right) \quad (3.41)$$

S_0 : Başlangıç substrat konsantrasyonu,

OC: Eklenen substrat için tüketilen oksijen,

OC için eklenen substrat için tüketilen oksijen olduğunu ve metabolizmanın bakım onarım veya endojen solunumunu için kullanılan oksijeni içermemekte olduğunu ifade etmektedirler.

Buna ilave olarak, Ciggin ve Orhon [22] oksijen kullanım hızı profili değerlendirildiğinde; kullanılan her birim hacim substrat konsantrasyonuyla tüketilen oksijen arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için Denklem 3.42 tanımlanabilir.

$$\Delta S_0 = (1 - Y_H) \Delta C_s \quad (3.42)$$

ΔS_0 (tüketilen oksijen miktarı), direk olarak oksijen kullanım hızı eğrisinden hesaplanabilmektedir. Eğer substrat giderimi ölçülürse Y_H 'in tanımlanmasına yardım etmektedir.

Son olarak da Suscka ve Ferreira [8] biyokütlenin oksijen gereksinimi denklemini Denklem 3.43'ü [18] kullanarak Denklem 3.44'ü elde etmişlerdir.

$$1 \text{ mg VSS} = 1,42 \text{ mg O}_2 \quad (3.43)$$

$$OC = dS - 1,42 \cdot Y \cdot dS \quad (3.44)$$

OC: Oksijen tüketimi (respirogramın alanı)

Y: Kullanılan substrata ilişkin mikrobiyal kütle verimi

Buradan Y parametresinin heabını Denklem 3.45 veya 3.46'daki gibi önermişlerdir.

$$Y = \frac{dS - OC}{1.42 dS} \quad (3.45)$$

$$Y = 0.704 \left(1 - \frac{OC}{dS}\right) \quad (3.46)$$

Bu bilgilere dayanarak biyokütle verim katsayısı (Y), reaktöre ilave edilen belli miktardaki subsrat ile değişen çözünmüş oksijen konsantrasyonları kaydedilerek respirogram elde edilmiş ve repiroramın alanından yararlanılarak bulunmuştur.

BÖLÜM 4

MATERYAL-METOT

Bu çalışmada farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksularla işletilen membran biyoreaktörlerdeki aktif çamurların respirometrik olarak kinetik ve stokiyometrik katsayılarının belirlene çalışması yapılmıştır. Membran biyoreaktörlere besleme için ilave edilen atıksuların C/N oranı 6, 21 ve 40 olacak şekilde farklı oranlarda glikoz ($C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$) ve amonyum klorür (NH_4Cl) eklenmesiyle oluşturulmuştur. Membran biyoreaktörlerden alınan aktif çamurların, açık respirometri örneği olan reaktörde çözünmüş oksijen konsantrasyonu ölçümüne dayanan Ros [1] tarafından önerilen yöntem ile oksijen transfer katsayısı, kinetik ve stokiyometrik katsayıları respirometrik olarak belirlene çalışmaları yapılmıştır.

4.1 Besleme İçin Kullanılan Sentetik Atıksular

İşletilmekte olan üç adet membran biyoreaktör Çizelge 4.1’de reçetesi bulunan üç farklı C/N sahip sentetik atıksularla beslenmiştir. Karbon azot oranları sırası ile 6, 21 ve 40 olup, sentetik atıksuyun içeriğindeki glikozdaki ($C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$) karbonun ağırlıkça oranına ve amonyum klorürdeki (NH_4Cl) azotun ağırlıkça oranına göre belirlenmiştir. Kinetik ve stokiyometrik parametreleri belirlene çalışmaları için de açık respirometrideki denemeler bu C/N oranlarındaki sentetik atıksularla yapılmıştır. Bu atıksulardan C/N oranı 6 olanın gerçek endüstriyel atıksu olarak C/N oranları 6’ya yakın olan gıda endüstrisi (soya, süt, papates vb.) atıksularını, C/N oranı 21 olanın gerçek evsel atıksuyu ve C/N oranı 40 olanın ise karbon oranı yüksek olan kağıt edndüstrisi atıksularını temsil etmektedir.

Çizelge 4.1 Sentetik atıksu reçetesi

Kimyasal	C/N: 6	C/N: 21	C/N: 40
C ₆ H ₁₂ O ₆ .H ₂ O, mg	1155	4042,5	7700
NH ₄ Cl, mg	267,5	267,5	267,5
KH ₂ PO ₄ , mg	50	50	50
K ₂ HPO ₄ , mg	15	15	15
FeCl ₃ .6H ₂ O, mg	15	15	15
MgSO ₄ .7H ₂ O, mg	50	50	50
NaHCO ₃ , mg	1800	1800	1800
CaCl ₂ , mg	22,5	22,5	22,5
Çeşme suyu, ml	900	900	900
Evsel atıksu, ml	200	200	200

4.2 İşletilmekte Olan Membran Biyoreaktörler

Farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksularla beslenen membran biyoreaktörler 20 L hacmindedir. Reaktörlerin ceket kısmında su banyosu ile istenilen sıcaklıkta su sirkülasyonu yapılarak reaktör sıcaklığı $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Havalandırma hava pompaları ile yapılmış olup, besleme ve süzüntü alma işlemi otomasyon sistemi ile belli aralıkta düzenli olarak yapılmıştır. Membran modülü olarak 0,4 µm gözenek çaplı hollow fiber membranlar kullanılmış ve MBR'ler sabit akıda çalıştırılmıştır. MBR'ler işletilmeye Ataköy İleri Biyolojik Arıtma Tesisi'nden alınan aktif çamurla başlatılarak Şekil 4.1'de görüldüğü üzere üç farklı MBR üç farklı C/N oranı 6, 21 ve 40 olan sentetik atıksularla beslenmeye başlanmıştır. Kinetik ve stokiyometrik katsayıları belirleme çalışması 40 gün çamur yaşında işletilirken yapılmıştır.



Şekil 4.1 İşletilen membran biyoreaktörler

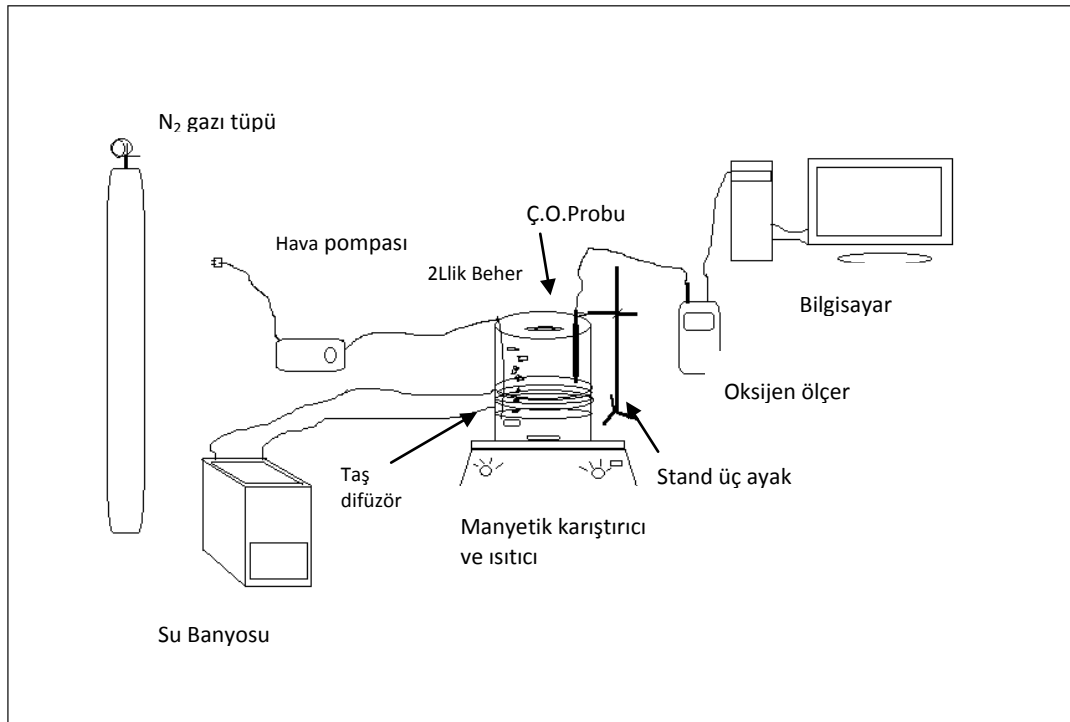
4.3 Kullanılan Deney Düzeneği

Kinetik ve stokiyometrik katsayıların belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği: Açık respirometri örneği olan 2L'lik plastik beher, manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı, su banyosu, ısı ceket, hava pompası ve merkezi hava sistemi, taş difüzör, azot gazı, çözülmüş oksijen ölçer (WTW MultiLine P4), çözülmüş oksijen probu (WTW CelloX 325), stand üç ayak, bilgisayar ve kayıt programından (Multi ACHAT II) oluşmaktadır (Şekil 4.2).

Atmosfere açık olduğundan sürekli olarak beslenebilmesi, biyolojik atıksu arıtma tesislerinin aerobik bölümünü en yakın şekilde temsil edebilmesi sebebiyle, ayrıca sistemin kurulumu basit ve kolay olduğu için açık respirometri seçilmiştir.



Şekil 4.2 Deney düzeneği



Şekil 4.3 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

MBR'lerden alınan aktif çamurların MLSS'i 1gr/L olacak şekilde seyreltme yapılarak açık respirometri örneği olan 2L'lik behere konulmuş, manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış ve aynı zamanda da hava kompresörü ile havalandırılmıştır. Reaktörün dışında ceket oluşturularak su banyosu aracılığı ile reaktörün sıcaklığı sabit tutulmuştur.

Çözünmüş oksijen, sıcaklık ve PH WTW marka Multi P4 ile ölçülmüştür. Çözünmüş oksijen probu olarak WTW Cellox 325 kullanılmıştır. Bu cihazla yapılan ölçümler Multi ACHAT II programı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Çözünmüş oksijen probunun kullanım klavuzuna uygun olarak düzenli olarak bakımı ve kalibrasyonu yapılmıştır. Klavuza uygun olarak temizleme solüsyonu (Cleaning solution RL/G 205 204) ile temizlenip, elektrolit solüsyonu (Electrolyte solution ELY/G 205 217) değiştirilerek tekrar kalibrasyonu yapılmıştır. Bu işlemten sonra yapılan kalibrasyonu uygun aralıkta gerçekleştirmediği durumda membranı (WP 90 membrane cap) yenilenmiştir. Deneyler karıştırıcı 500 rpm sabit hızda çalıştırılarak yapılmıştır. Prob ile difüzörün reaktördeki yeri, aktif çamur süspansiyonunda difüzörün oluşturduğu hava kabarcıklarından çözünmüş oksijen ölçümü etkilenmeyecek şekilde ayarlanmıştır.

4.4 K_a, Kinetik ve Stokiyometrik Katsayıları Belirleme Çalışmaları

Bir önceki bölümde belirtildiği üzere parametreleri belirleme çalışmaları 2 L'lik açık respirometride 1 L çalışma hacminde ve 1 gr/L MLSS konsantrasyonunda yapılmıştır. Bu hacim ve konsantrasyona karar verebilmek için bir takım deneme çalışmaları yapılmıştır. Bu deneme çalışmalarında çalışma hacmi 2 L, MLSS konsantrasyonu olarak da konvansiyonel aktif çamur sistemlerindeki konsantrasyonu temsilen 2 gr/L'de yapılmıştır. Bunun sonucunda μ_{max} katsayısını belirlemek için reaktöre ilave edilen atıksu (substrat) miktarlarının fazla olduğu ve ilk atıksu ilavesinden sonraki atıksu ilavelerinde MLSS'deki değişimlerin daha fazla olduğu görülmüştür. Deneme çalışmalarından sonra 0,5 gr/L MLSS ve altındaki konsantrasyonlarda yapılacak çalışmaların 1 gr/L'ye göre daha hassas olması gerektiği düşünülerek 2 L'lik reaktördeki çalışma hacmi 1 L, MLSS konsantrasyonu olarak da 1 gr/L olmasına karar verilmiştir.

MBR'lerde işletilen system 40 gün çamur yaşında kararlı hale geldiğinde MLSS konsantrasyonu her MBR'de farklı olmakla beraber sırasıyla C/N oranı 6, 21 ve 40 için yaklaşık 17 gr/L, 22 gr/L, 23 gr/L civarındadır. Alınan aktif çamurların MLSS

konsantrasyonlarını 1000 mg/L'ye düşürmek için şebeke suyu ile seyreltme yapılmıştır. Seyreltme yapıldıktan sonra reaktördeki aktif çamur süspansiyonunun çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve sıcaklığı takip edilerek sistemin endojen safhaya geçerek dengeye gelmesi sağlanmıştır. Yapılan deneme çalışmaları sonunda sistemin yaklaşık 3 saat sonra sıcaklık ve çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişmediği gözlenerek dengeye geldiği gözlenmiştir.

Endojen respirasyon durumunun ortalama zamanını tanımlamak zor olup, endojen solunum durumuna ulaşmak için genellikle dört saatlik havalandırma süresi yeterlidir [8].

Üç farklı C/N oranında işletilen MBR'lerden alınan üç farklı aktif çamur endojen safhaya ulaştıktan sonra oksijen transfer katsayısı (K_{La}) parametresi ile diğer kinetik ve stokiyometrik (μ , μ_{max} , Y ve K_d) parametreleri belirleme çalışmaları yapılmıştır. Katsayı belirleme çalışmaları ise önce C/N oranı 6 olarak işletilen aktif çamurda, daha sonra C/N 21 olan ve son olarak da C/N oranı 40 olan aktif çamurda yapılmıştır.

4.4.1 K_{La} Katsayısını Belirleme Çalışması

40 gün çamur yaşında işletilmekte olan MBR'lerden alınan aktif çamurlar MLSS konsantrasyonu 1000 mg/L'ye seyreltilmiş reaktörün 1L hacimde ve aktif çamurlar endojen safhaya geldikten sonra reaktörün havası kesilerek sisteme azot gazı verilmiş çözünmüş oksijen konsantrasyonunun 0,5 mg/L'ye kadar düşmesi beklenmiştir. Reaktörün açık kısmı kısmen kapatılarak oksijen konsantrasyonunun daha kısa sürede düşmesi sağlanmıştır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0,5 mg/L'nin altına düştükten sonra azot gazı kesilip hava verilerek başlangıçtaki endojen safha denge konsantrasyonuna gelene kadar ölçümler kaydedilmiştir. 5 saniye aralıklarla kaydedilen ölçümlerin zamana karşı grafiği Şekil 3.10'da sunulmuştur. Grafiğin eğiminden nonlineer regresyon tekniği ile Sigma Plot 10.0 programı yardımıyla K_{La} katsayısı belirlenmiştir. Ölçümler boyunca reaktöre verilen havanın debisi, reaktör sıcaklığı ve karıştırma hızı sabit tutulmuştur.

4.4.2 μ , μ_{max} , K_s ve Y Parametrelerini Belirleme Çalışması

MBR'ler 40 gün çamur yaşında işletilirken alınan aktif çamurlardan sırasıyla C/N oranı 6, 21 ve 40 olan çamurların parametre belirleme çalışmaları yapılmıştır.

C/N oranı 6 olan aktif çamur için; aktif çamurun K_{La} katsayısı belirlendikten sonra endojen safhada olan aktif çamur süspansiyonunun havası kesilip karıştırıcı durdurularak çökmesi beklenmiştir. Çamur çökteldikten sonra üstteki duru sudan (süpernatant) 20mL çekilmiş ve reaktör tekrar havalandırılıp karıştırılmıştır. 980 mL hacminde olan reaktördeki aktif çamur süspansiyonun çözünmüş oksijeni denge konsantrasyonuna (C_e) ulaştığında sisteme 20 mL C/N oranı 6 olan sentetik atıksu ilave edilmiştir. İlave sonrası çözünmüş oksijen değeri belli değere kadar düşüp (respirogramdaki t_2 zamanındaki konsantrasyon= C_{min} (Şekil 3.11)) reaktör içindeki substrat mikroorganizmalar tarafından tüketilince çözünmüş oksijen konsantrasyon değeri artmaya başlamıştır. Reaktör içindeki substrat tamamen bittiğinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu tekrar denge değerine ulaşmıştır. Çözünmüş oksijen denge konsantrasyonunda iken substrat ilavesinden önce 5 sn aralıklarla 15-20 kayıt ile beraber substrat tüketildikten sonraki dengeye gelene kadar alınan kayıtlar grafiğe geçirildiğinde Şekil 3.11'dekine benzer respirogramlar elde edilmiştir. 20 mL için kayıtlar bittikten sonra reaktörün havası kesilip karıştırıcı durdurulmuştur. Çökelmeden sonra bu kez 40 mL süpernatant çekilmiş ve sistem tekrar karıştırılıp havalandırılarak dengeye gelmesi beklenmiştir. Çözünmüş oksijen denge konsantrasyonuna (C_e) ulaşıldıktan sonra yine C/N oranı 6 olan atıksudan çekilen kadar (40mL) ilave edilince çözünmüş oksijen konsantrasyonu belli C_{min} değerine kadar düşmüştür. İlave edilen 40 mL atıksu için elde edilen C_{min} değeri 20 mL'ninkinden daha düşük seviyededir. C/N oranı 6 olan atıksu için aynı işlemler 50mL, 70mL ve 90mL için yapılmış ve respirogramları çizilmiştir. C_{min} değeri (1L hacimde 1gr/L MLSS'de) 90mL'den sonra daha da düşmeyerek 70mL'de elde edilen değerle yaklaşık aynı değerde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla C/N oranı 6 için 90 mL de sabit hacim ve MLSS konsantrasyonunda (1L ve 1gr/L) maksimum eksojen oksijen kullanım hızına ulaştığı gözlenmiştir ve C/N oranı 6 için 90mL'den sonra substrat ilavesi yapılmamıştır. Bölüm 4'te belirtildiği üzere elde edilen çözünmüş oksijen değerlerinden r_e (R_e) değerleri hesaplanmış ve bu

değerler kullanılarak μ , $\mu_{\max}$ ve K_s parametreleri belirlenmiştir. Y parametresi ise respirogramın alanı kullanılarak hesaplanmıştır.

Aynı işlemler C/N oranı 21 ve 40 olan sentetik atıksularla işletilen aktif çamurlar için yapılmıştır. C/N oranı 21 olan aktif çamur için ilave edilen substrat miktarları 2,5 mL, 10mL, 20mL, 30mL ve 40mL'dir. C/N oranı 21 için maksimum eksojen solunum hızına 40mL'de ulaştığı görülmüştür. C/N oranı 40 için ise 10, 20, 40, 60 ve 80 mL substrat ilaveleri yapılmış ve maksimum eksojen solunum hızı 80 mL de gözlenmiştir. C/N oranı 21 ve 40 için yine elde edilen respirogramlardan ve r_e (R_e) değerlerinden μ , $\mu_{\max}$, K_s ve Y parametreleri belirlenmiştir.

4.4.3 k_d Katsayısını Belirleme Çalışması

Parametre belirleme çalışmalarında üç farklı C/N oranı için de sırasıyla önce $K_L a$ parametresi, sonra μ , $\mu_{\max}$ ve Y parametreleri en son olarak da k_d parametresi belirleme çalışmaları yapılmıştır.

k_d parametresi belirlenirken her C/N oranı için de aynı olarak; 1L hacimde ve 1 gr/L MLSS'e sahip aktif çamurlar endojen safhaya getirilerek ağzı kapatılabilecek 1L'lik cam behere aktarılmıştır. Beherde birkaç dakika havalandırıldıktan sonra karıştırmaya devam edilip difüzör çıkarılarak havalandırılması durdurulmuştur. Karıştırma sabit hızda çalışmaya devam ederken beherin içinde çözünmüş oksijen probu olacak şekilde ağzı sıkıca kapatılıp herhangi bir yerinden hava alması engellenmiştir. Bu halde çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının düşüşü gözlenerek ölçümler yine 5'er sn aralıklarla kaydedilmiştir. Çözünmüş oksijen konsantrasyon kayıtlarının grafiği çizildiğinde Şekil 3.9'daki grafik elde edilerek grafiğin eğimi yardımıyla üç farklı çamur için de k_d parametreleri Denklem 3.16 yardımıyla hesaplanmıştır.

4.5 Yapılan Analizler

Çözünmüş oksijen ölçümleri; oksijen ölçer ve probu (WTW Multi P4 ve WTW Cellox 325) ile yapılmıştır. Atıksuların, reaktörlerin ve şebeke suyunun pH ve sıcaklıkları aynı oksijen ölçer ve pH probu (SenTix 41) ile yapılmıştır. Sentetik atıksuların Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Standard Metotlar (2005) 5520 C Closed Reflux Method'una göre

yapılmıştır. Sentetik atıksuların Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ₅) Standard Metotlar 5210 B 5-Day BOD Test BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD) metodu ile yapılmıştır. Aktif çamurların MLSS (Karışık Sıvıda Askıda Katı Madde)'si Standard Metotlar (2005) 2540 D'ye göre yapılmıştır.

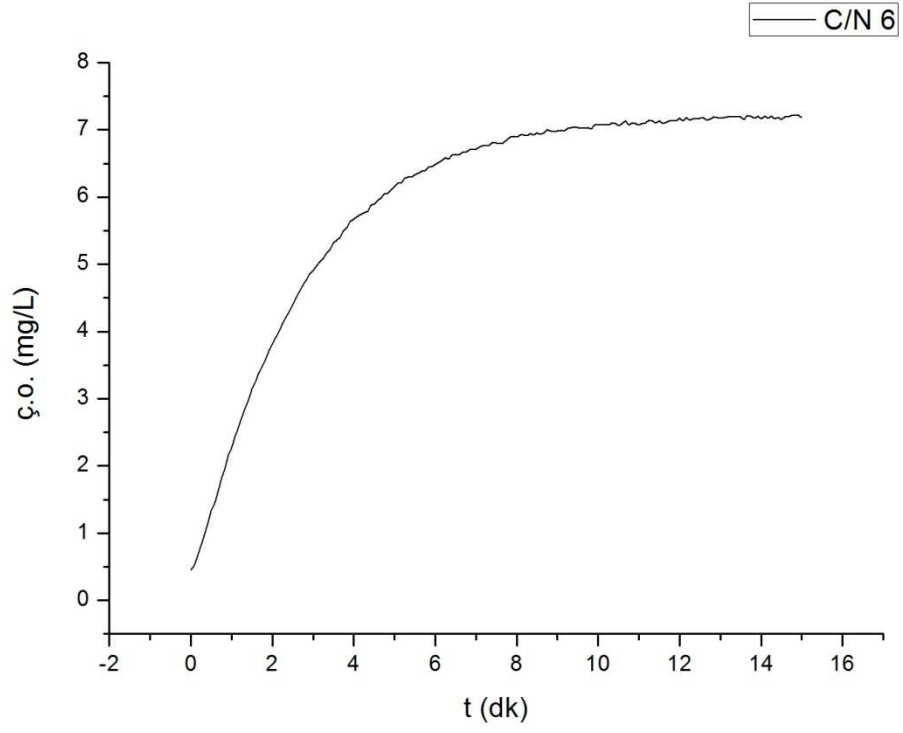
BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

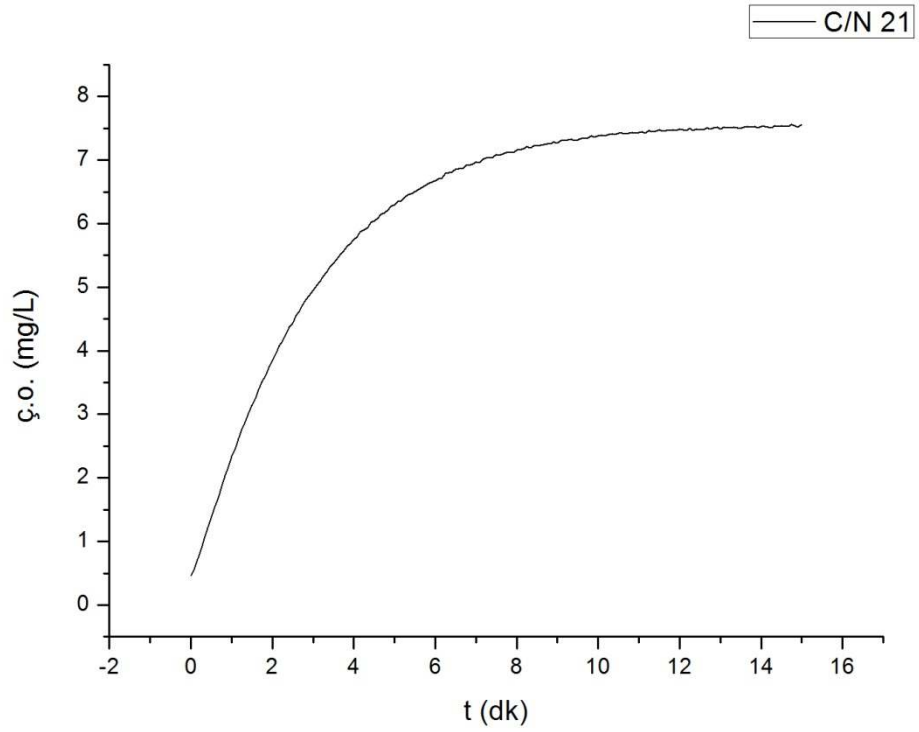
Üç farklı C/N oranında sentetik atıksularla işletilen MBR'lerdeki aktif çamurların oksijen transfer katsayısı (K_{La}), solunum hızına bağlı olarak kinetik ve stokiyometrik katsayılarını belirleme çalışmalarının sonuçları ve elde edilen değerlerden oluşturulan grafikler bu bölümün izleyen kısımlarında sunulmuştur. Bölüm 4'te ifade edildiği gibi MBR'lerden alınan aktif çamurlar için açık respirometride 1 gr/L MLSS konsantrasyonda çalışmalar yapılarak her bir C/N oranı farklı çamur için önce oksijen transfer hızı katsayısı ve daha sonra diğer parametreler hesaplanmıştır.

5.1 K_{La} Parametresi Belirleme Çalışması Sonuçları

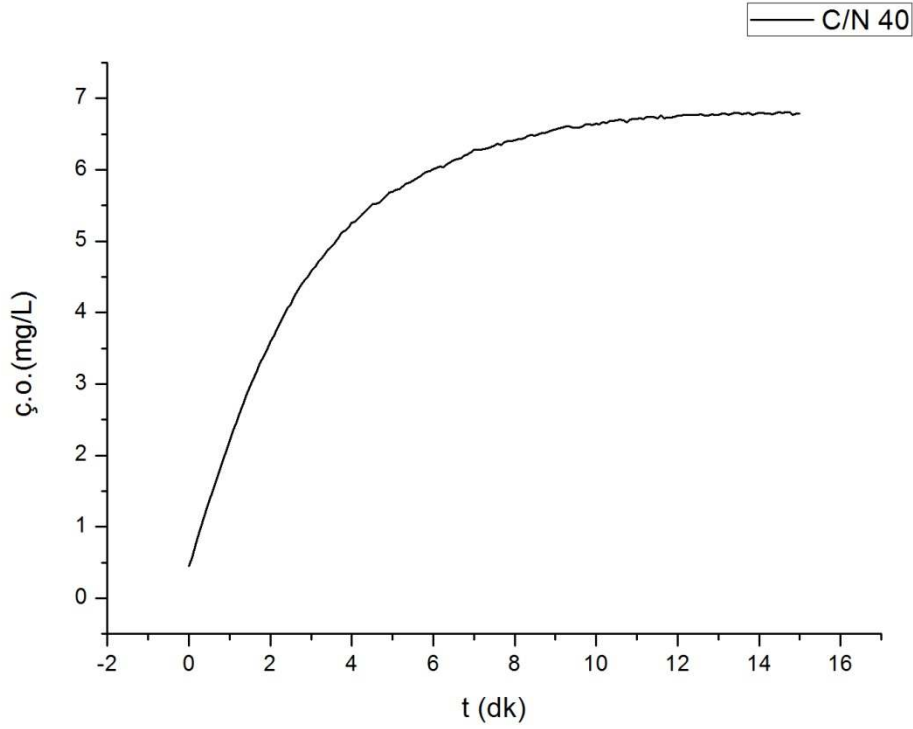
Bölüm 4'te belirtilen şekilde yürütülen açık respirometri çalışmalarının sonuçları Şekil 5.1, 5.2, 5.3'te sunulmuştur. Buna göre K_{La} değerleri C/N oranı 6 olan çamur için 0,3499 gün⁻¹, C/N oranı 21 olan çamur için 0,3273 gün⁻¹ C/N oranı 40 olan çamur için 0,3387 gün⁻¹ şeklinde bulunmuştur.



Şekil 5.1 C/N oranı 6'nın K_La grafiği



Şekil 5.2 C/N oranı 21'in K_La grafiği



Şekil 5.3 C/N oranı 40'ın K_{La} grafiği

Tüm aerobik atıksu arıtma proseslerine benzer şekilde MBR'lerde de biyokütle özellikleri ve havalandırma sistemi dizaynı oksijen transferini etkilemektedir. Biyokütle; mikroorganizmalar, kolloidler, organik polimerler ve katyonlar gibi heterojen partiküllerin karışımıdır. Bu bileşenlerin her biri farklı şekillere, boyutlara ve yoğunluklara sahiptir. Bütün bu parametreler oksijen transferini etkilemektedir. Germain ve Stephenson [30] yapmış oldukları çalışmada partikül konsantrasyonu, partikül boyutu ve viskozitenin oksijen transferi üzerinde etkili ana parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Flok boyutunun daha büyük olduğu sistemlerde çözünmüş oksijen konsantrasyonu daha yüksek olmaktadır.

Bu çalışmada bulunan değerler göz önüne alındığında üç farklı aktif çamur için de farklı değer bulunmuş olmakla beraber birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. K_{La} gaz akışına, kabarcık boyutuna, reaktör boyutuna, çamurun karışmasına ve sıcaklığına, hava basıncına bağlıdır [1]. Üç farklı aktif çamur için de K_{La} deney şartları, reaktör boyutu ve gaz akışı aynı olduğundan farklılığın hazırlanan atıksuların C/N oranlarının

farklı olması nedeniyle oluşan çamur yapılarının, EPS miktarlarının, vizkozitelerinin farklı olması sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürdeki aynı yöntem ile yapılan çalışmalara (Çizelge 5.1) bakıldığında, bu çalışmada bulunan değerlerin diğer çalışmalarla paralellik sergilediği görülmektedir.

Çizelge 5.1 Literatürde verilen K_{La} değerleri

Yapılan Çalışmalar	K_{La} (dk ⁻¹)
Ozbek and Gayik [29]	0,083-2,65
Topaloğlu [7]	0,276
Nittami vd. [31]	0,2-0,5
Puthli vd. [32]	0,12-0,96
Bu çalışma	0,33-0,35

5.2 μ , μ_{maks} , K_s ve Y Parametrelerini Belirleme Sonuçları

Bölüm 3'te ifade edildiği üzere K_{La} parametresi belirlenen aktif çamur endojen safhadayken sisteme substrat ilavesiyle eksojen faz oluşarak değişen çözünmüş oksijen konsantrasyonları kaydedilerek grafiğe aktarıldığında respirogramlar elde edilmiştir. Eksojen safhada oksijen kullanımının en fazla olduğu yer respirogramın (Şekil 3.11) t_2 zamanındaki pik noktasıdır. Burada çözünmüş oksijen konsantrasyonu değişmeyerek $\frac{dC}{dt} = 0$ olup Denklem 3.18'deki eksojen oksijen kullanım hızı ($r_e = R_e$) ve substrat kullanım hızı en yüksek değerine ulaşmıştır.

Sabit hacim, MLSS konsantrasyonu, sıcaklık ve hava debisinde sisteme artan miktarda substrat ilave edildiğinde r_e (R_e) değerleri artarak maksimum değerine ulaşmıştır. Yeterli miktarda substrat ilavesinde maksimuma ulaşan r_e (R_e) değerleri maksimumda sabit kalarak daha fazla artmamaktadır (Şekil 5.4, 5.6 ve 5.8). Dolayısıyla sabit hacim ve konsantrasyondaki aktif çamur süspansiyonun çoğalma hızı da substrat sınırlamasından dolayı ortamdaki substrat miktarı arttıkça artarak maksimuma ulaşmıştır.

Solunum hızına bağılı olarak aktif çamurun kinetik ve stokiyometrik parametrelerinin belirlenmesinde r_e (R_e) değerleri kullanılarak Y dönüşüm faktöründe dikkate alınarak belirlenmiştir [2]. Bu çalışma için bulunan r_e (R_e) değerlerinden ve respirogramlar yardımı ile bu farklı öneriler göz önüne alınarak kinetik ve stokiyometrik parametreler değerlendirilmiştir.

Sisteme ilave edilen substrat miktarı KOİ cinsinden ifade edilerek C/N oranı 6 olan aktif çamur için hazırlanan sentetik atıksuyun KOİ'si 1000 mg/L olup, C/N oranı 21 için 3010 mg/L ve C/N oranı 40 için ise 7000 mg/L olarak hesaplanmıştır.

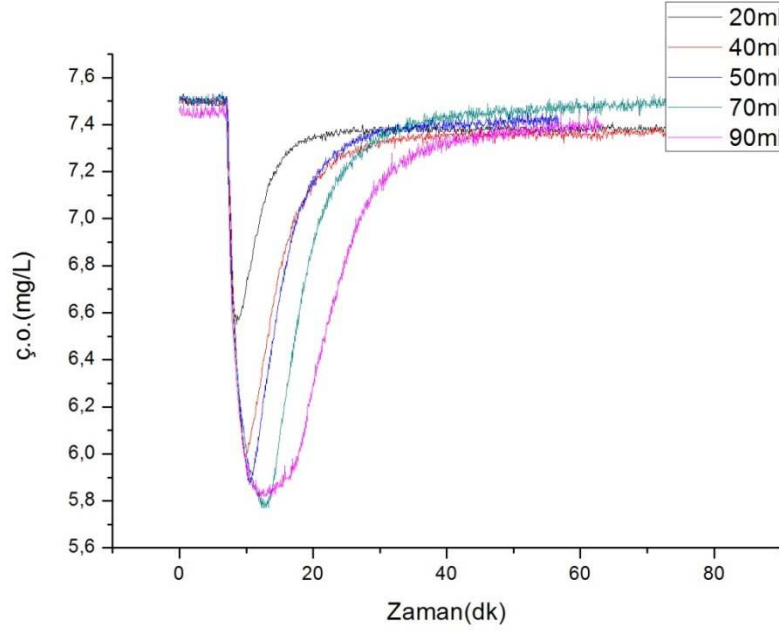
Üç farklı C/N oranında işletilen çamurlar için elde edilen respirogramlar ve R_e (r_e) grafikleri Şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9'da verilmiştir.

C/N oranı 6 olan sentetik atıksu ile işletilen aktif çamurda eksojen oksijen kullanımından elde edilen respirogramlar Şekil 5.4'te, r_e grafiğı ise Şekil 5.5'te gösterilmiştir. C/N oranı 21 olan sentetik atıksu için respirogramlar Şekil 5.6'da, zamanla r_e değerinin değişimi ise Şekil 5.7'de gösterilmiştir. C/N oranı 40 olan sentetik atıksu için ise respirogramlar Şekil 5.8'de, r_e grafiğı de Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

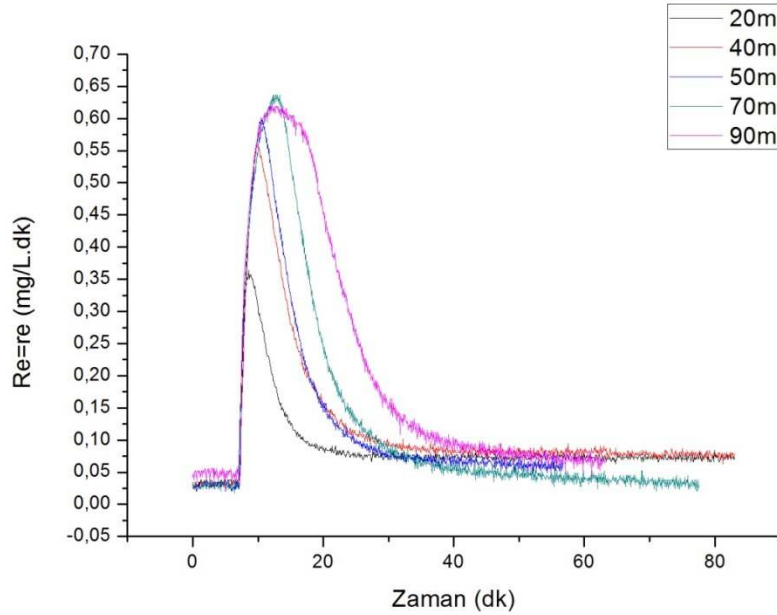
Yukarıda da ifade edildiğı gibi aktif çamur süspansiyonu endojen solunuma geçtikten sonra sisteme C/N oranı 6 olan aktif çamur için C/N oranı 6 olan atıksudan 20, 40, 50, 70 ve 90ml ilave edilmiştir. Şekil 5.4'ten görülebileceğı gibi elde edilen respirogramların alanları farklı olmaktadır. İlave edilen atıksu hacminin artmasıyla r_e değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Ancak ilave edilen 70ml ile 90ml hacimlerindeki atıksulardan elde edilen r_e değerleri hemen hemen eşit olduğundan $r_{e,max}$ değerine ulaşıldığı kanaatine varılarak başka deneme yapılmamıştır. r_e grafiğinin tepe noktasındaki bu eşitlik değeri maksimum oksijen kullanım hızını vermektedir. Böylece $r_{e,max}$ değerinden (maksimum oksijen kullanım hızı) Denklem 3.34 yardımıyla maksimum spesifik çoğalma hızı bulunmuştur. C/N Oranı 6 olan aktif çamur için μ_{maks} değeri $1,37 \text{ gün}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

C/N oranı 21 için 2.5, 5, 10, 20, 40 ml atıksu denemeleri yapılmış ve Şekil 5.6'da görülen respirogramlar ve Şekil 5.7'deki r_e grafikleri elde edilmiştir. C/N Oranı 21 olan aktif çamur için ise μ_{maks} değeri $1,80 \text{ gün}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

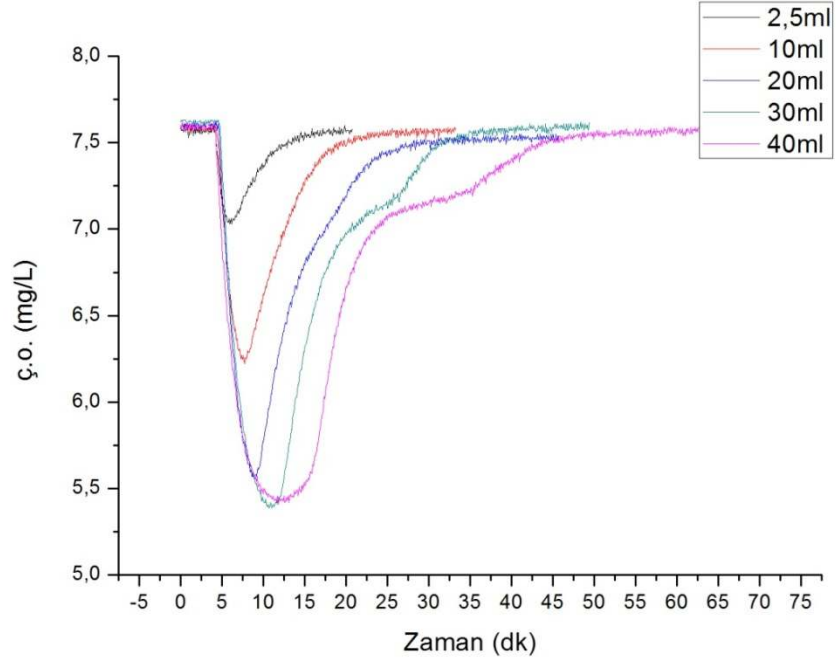
C/N oranı 40 için 10, 20, 40, 60, 80 ml atıksu denemeleri yapılmış ve Şekil 5.8’de görülen respirogramlar ve Şekil 5.9’daki r_e grafikleri elde edilmiştir. C/N Oranı 40 olan aktif çamur için μ_{maks} değeri de $0,71 \text{ gün}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



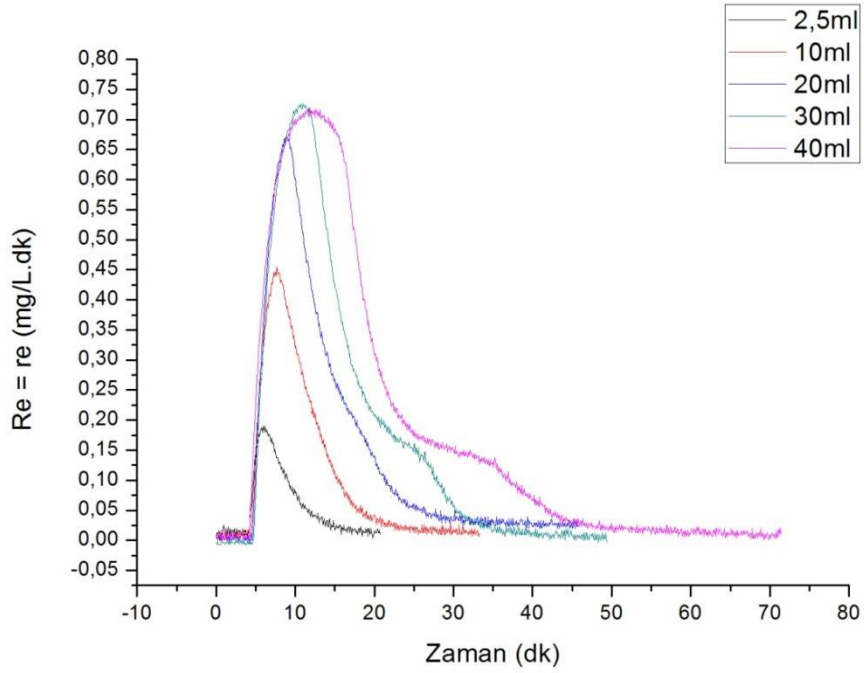
Şekil 5.4 C/N oranı 6'nın respirogramları



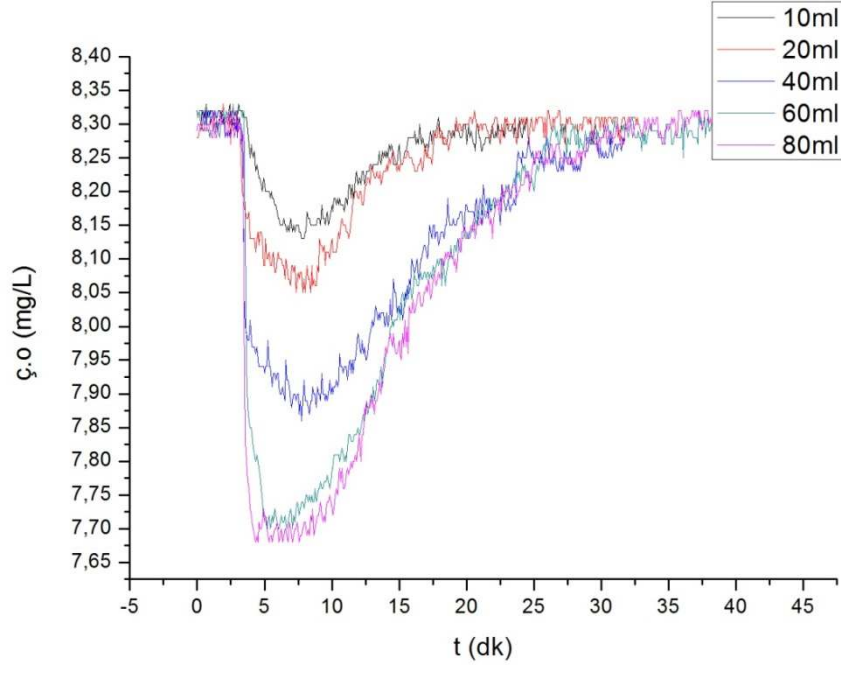
Şekil 5.5 C/N oranı 6'nın r_e grafiği



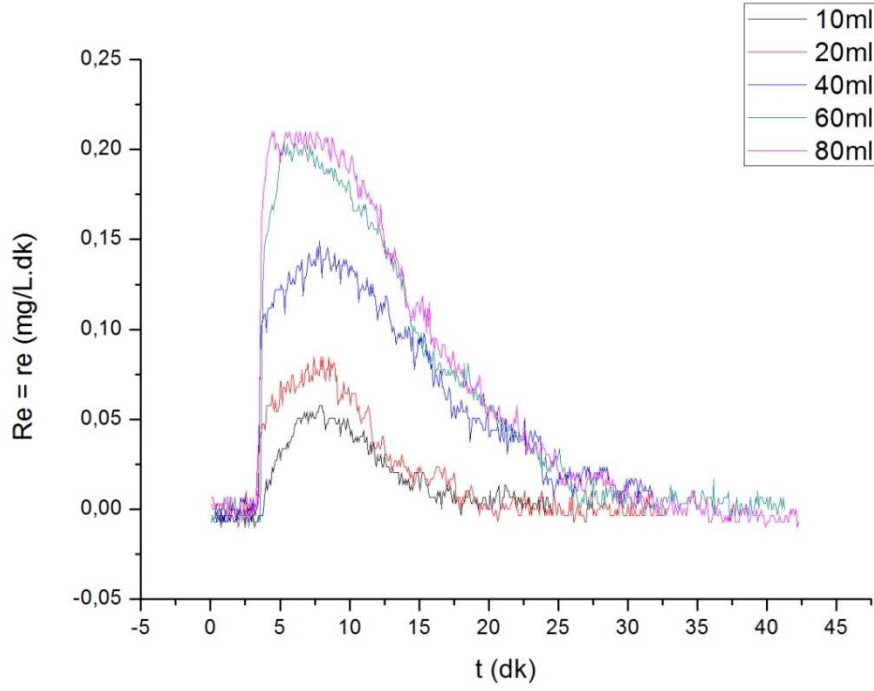
Şekil 5.6 C/N oranı 21'in respirogramları



Şekil 5.7 C/N oranı 21'in r_e grafiği



Şekil 5.8 C/N oranı 40'ın respirogramları



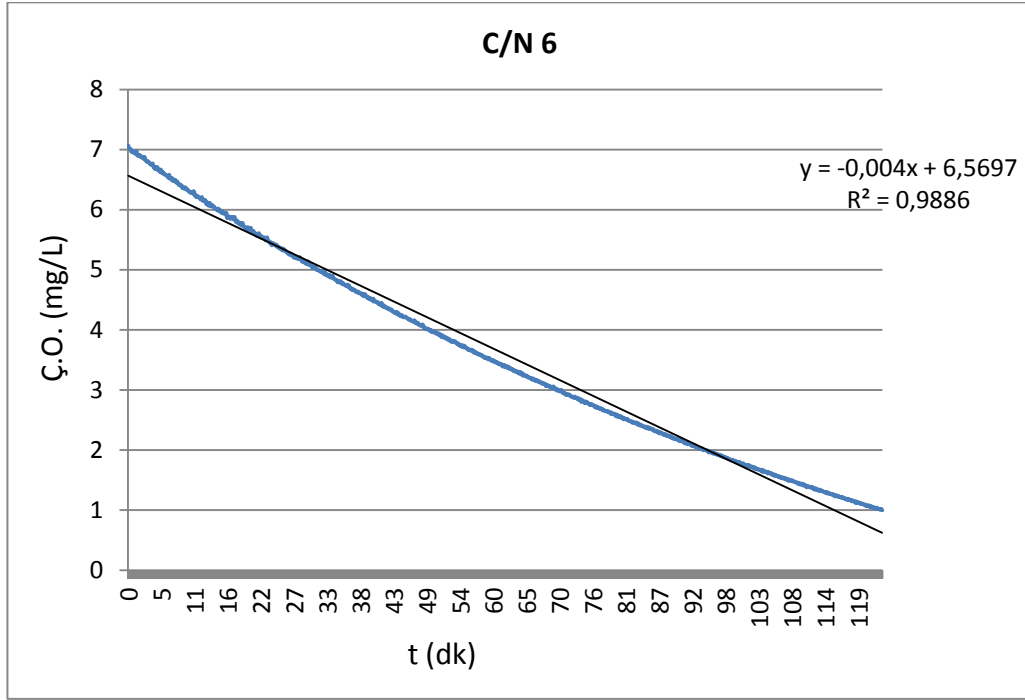
Şekil 5.9 C/N oranı 40'ın r_e grafiği

5.3 k_d Katsayısını Belirleme Çalışması Sonuçları

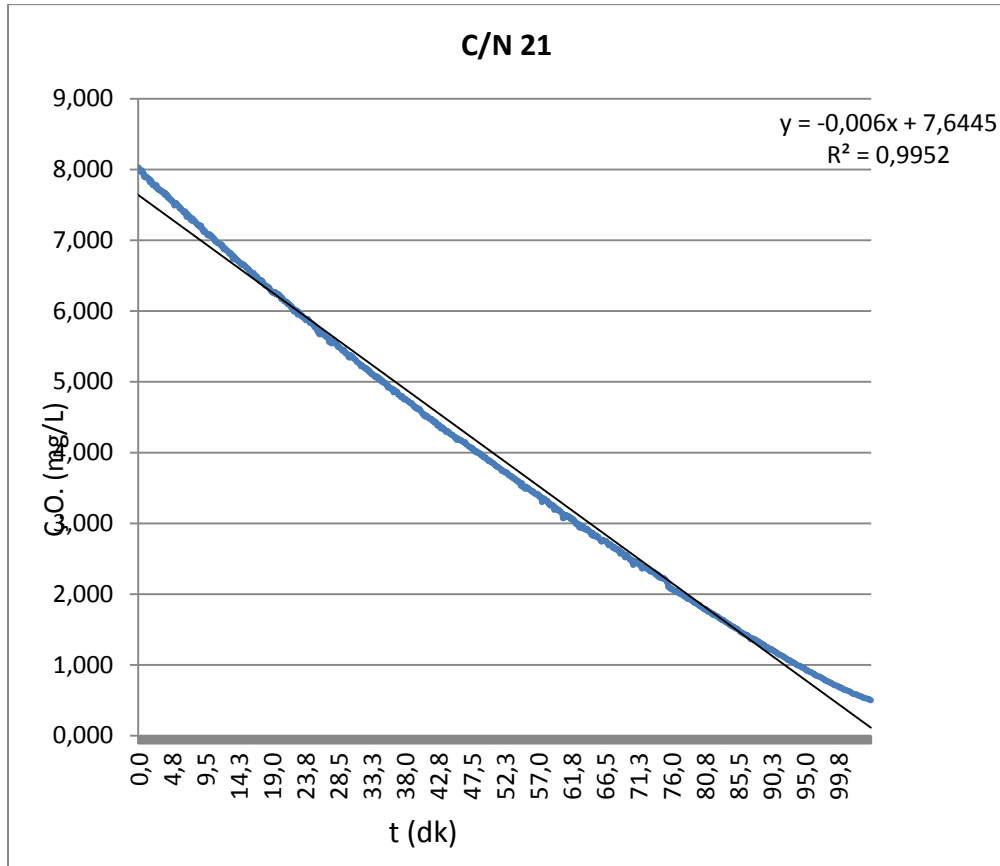
Çamur solunum hızı veya endojen oksijen kullanım hızı; kaydedilen çözünmüş oksijen konsantrasyonları grafiğinin eğiminden Denklem 3.35 gereği hesaplanmıştır. k_d içsel solunum (endojen ayrışma) katsayısı Denklem 3.36'dan hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalardan C/N oranı 6 olan sentetik atıksu ile işletilen aktif çamur için k_d değeri 0,1023 gün⁻¹, C/N oranı 21 için 0,1495 gün⁻¹ ve C/N oranı 40 için 0,2912 gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

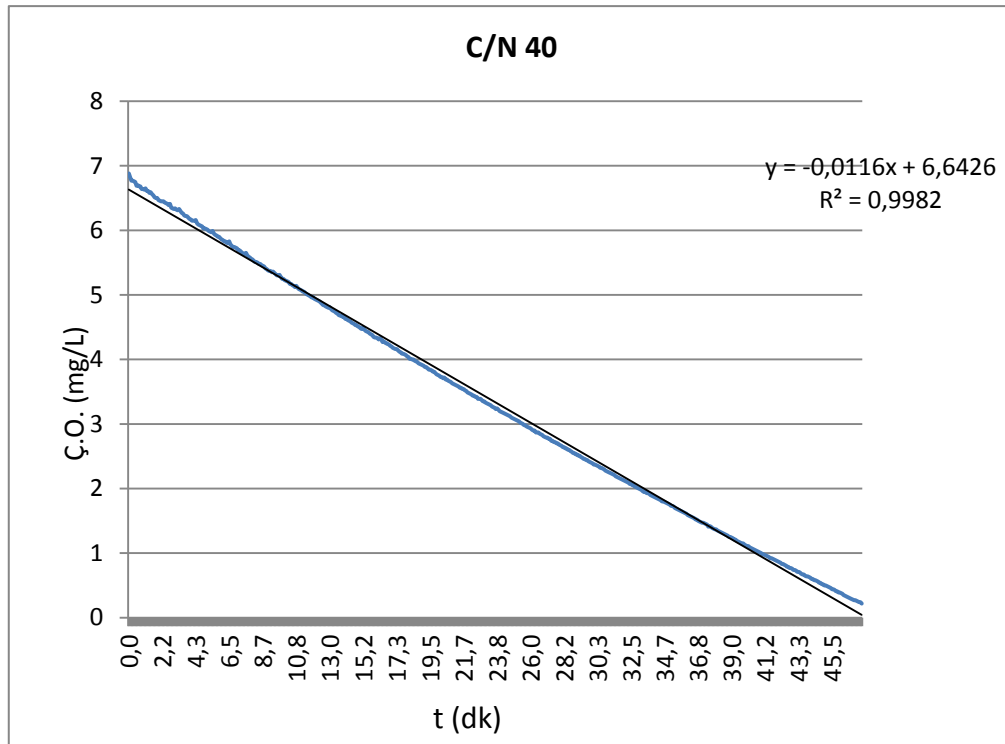
Çözünmüş oksijen düşüşü değerlerinden oluşturulan C/N oranı 6 olan sentetik atıksu ile işletilen aktif çamur için $r_s=r_i$ grafiği Şekil 5.10'da, C/N oranı 21 için Şekil 5.11'de ve C/N oranı 40 için Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10 C/N oranı 6 için r_s grafiği



Şekil 5.11 C/N oranı 21 için r_s grafiği



Şekil 5.12 C/N oranı 40 için r_s grafiği

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Membran biyoreaktörler yüksek çamur yaşlarında ve biyokütle konsantrasyonlarında çalıştırılabilirmeleri sebebiyle yüksek kirlilik içeren sentetik ve gerçek atıksu arıtımına uygun sistemlerdir. Hazırlanan sentetik atıksuyun ve gerçek atıksuların özelliklerine göre aktif çamurun davranışı da değişmektedir. Böylece arıtma sistemleri tasarımında ve işletilmesinde kullanılan kinetik ve stokiyometrik katsayılar da değişmektedir.

Kinetik ve stokiyometrik katsayıları belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır [5][6][7][33][42][43]. Respirometrik yöntem basit kurulumu ve daha hızlı sonuç vermesi sebebiyle tercih edilmiştir. Özellikle açık respirometri gerçek ölçekteki sistemleri temsil etme oranının daha yüksek olması ve substratın aktif çamura uyumu arasında daha çabuk sonuç vererek atıksuyun arıtılabilirliği hakkında kısa sürede bilgi vermektedir.

Evsel atıksu arıtma tesisinden alınan aktif çamurun farklı endüstrileri temsil edebilecek nitelikte olan farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksularla işletilmesi aktif çamurun yapısında; fiziksel ve yüzey kimyası gibi özelliklerini ve ayrıca mikrobiyal faaliyetleri değiştirmektedir. Yapılan çalışma ile ulaşılmak istenen C/N oranının değişmesi ile aktif çamurun kinetik ve stokiyometrik katsayılardaki değişim ve bulunan sonuçların literatürdeki sentetik ve gerçek atıksu ile işletilen aktif çamurlarla karşılaştırılmasıdır. Ayrıca respirometrik yöntem ve klasik (Monod) yöntem ile yapılan çalışmalar da değerlendirilmiştir.

Bulunan değerler literatürde verilen değerlerle kıyaslandığında, evsel atıksu ve aktif çamur için tipik değerlere bazı parametreler uygun aralıkta olduğu bazılarının da farklı olduğu görölmektedir. Çoğu batık MBR 40 günden daha yüksek çamur yaşımda işletilmektedir. Bu nedenle batık MBR'lerin işletme parametreleri konvansiyonel atıksu arıtma sistemlerinden farklı olmaktadır [33]. C/N oranına göre değerlendirildiğinde; C/N oranı arttıkça Y ve k_d parametreleri artmaktadır. C/N oranı 40 olan atıksu için Y, k_d ve K_s değeri diğerlerinden büyük μ_{maks} değeri ise diğerlerinden küçük bulunmuştur.

Üç C/N oranı için de μ_{maks} değerinin düşük olduğu görölmektedir (Çizelge 2.1). Bunun nedeni olarak Çizelge 2.1'de verilen sentetik atıksularda görölen göröldüğü gibi μ_{maks} değerinin düşük olduğu ve çalışılan atıksuyun sentetik atıksu olması söylenebilir. Al-Malack [33]'ın klasik yöntem ile 10 ve 15 gr/L MLSS'de bulmuş olduğu K_s değerleri sırasıyla 1967 ve 2933 mg KOİ/L dir. K_s parametresinin çok yüksek olmasını k_d parametresinin belirlenmesinin etkilediğini ifade etmektedir. Bu nedenle respirometrik yöntemle belirlenen μ_{maks} değerlerinin Y parametresine bağlı olduğu için de düşük bulunduğu söylenebilir.

Al-Malack [33] sentetik atıksu ile işletilen membran biyoreaktör için yaptığı çalışmada MLSS konsantrasyonu 3 ve 5 gr/L için bulduğu μ_{maks} değerleri 1,28 ve 1,39 gün⁻¹ dır. Bunun nedeni olarak düşük çamur yaşlarında yüksek büyüme hızına sahip mikroorganizma türlerinin baskın olabileceğini ve bu nedenle yüksek çamur yaşında büyüme hızının düşeceğini ifade etmektedir. Ayrıca bu çalışmadaki atıksular glikozla hazırlanmış olmasına rağmen C/N oranı 21 olan sentetik atıksuyun μ_{maks} değeri evsel atıksuyun değerinden düşük bulunmuştur. Bu durumun nedeni olarak yüksek çamur yaşı ve katsayı belirleme yönteminin etkili olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.2'de göröldüğü üzere yüksek sıcaklıklarda spesifik çoğalma hızının (μ_{maks}) ve endojen solunum hızının (k_d) arttığı görölmektedir. Bununla ilgili olarak Vogelaar vd. [44] yaptıkları çalışma için termofilik şartlarda μ_{maks} ve k_d parametrelerinin arttığını Y ve K_s parametrelerinin değişmediğini ifade etmişlerdir.

Sentetik olarak hazırlanan C/N oranları 6, 21 ve 40 olan atıksulardan, C/N oranı 6 olanın yaklaşık bu C/N oranına yakın olabilecek gıda endüstrisi atıksularını, C/N oranı 21 olanın gerçek evsel atıksuyu ve C/N oranı 40 olanın kağıt endüstrisi atıksularını temsil

ettiği ifade edilmişti. Bu duruma göre C/N oranı 6 olan sentetik atıksuyla beslenen aktif çamurdaki parametrelerden K_s parametresinin düşük olması mikroorganizmaların atıksuya affinitesinin yüksek olduğunu ve atıksuyun kolay parçalandığını göstermektedir. C/N oranı 6 olan sentetik atıksuyu temsil edebilecek gerçek atıksu olarak C/N oranı 10 civarında olan patates işleme endüstrisi atıksuyunda Topaloğlu'nun [7] ve Contreras vd. [42] yapmış olduğu çalışmalara bakıldığında K_s parametrelerinin düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışmada C/N oranı 6 için bulunan μ_{maks} değerinin C/N 21'e yakın olması da biyolojik olarak kolay parçalandığını göstermektedir.

Bulunan değerlere göre μ_{maks} değerinin C/N oranının 21 olan atıksu ile beslenen aktif çamurda en yüksek olduğu görülmektedir. Sentetik atıksuyun hazırlanmasında aynı glikoz ve amonyum klorür kullanılmasına rağmen C/N oranının spesifik çoğalma hızını etkilediği gözlenmiştir. C/N 21 oranı evsel atıksuyu temsil ettiğinden çoğalma hızının diğerlerine göre yüksek olması ve K_s değerinin daha kolay parçalandığını ve dolayısıyla ideal C/N oranını göstermektedir.

C/N oranı 40 olan sentetik atıksuyun C/N oranına göre temsil ettiği kağıt endüstrisi atıksuyu için Çizelge 5.2'deki değerler [43] göz önüne alındığında, k_d ve K_s parametreleri bakımından diğer karbon azot oranlarına göre yüksek olması ve literatürdeki aynı endüstrinin değerlerine yakın olması sebebiyle gerçek atıksuyu temsil ettiği söylenebilir.

Hazırlanan sentetik atıksuların hepsinde glikoz kullanılmasına rağmen, atıksuyun C/N oranlarının farklı olması substratın biyokütleye dönüşme hızını da değiştirmektedir. Bu sebeple Sürücü dv. [38] yaptıkları glikoz kullanılarak hazırlanan sentetik atıksu ile ilgili bir çalışmada Y değeri 0,34 g/g bulunurken, Strotman vd. [45] yapmış olduğu benzer bir çalışmada ise glikozun biyokütleye dönüşüm oranı 0,82 olarak hesaplanmıştır. Literatürden de anlaşılacağı gibi glikozun ana madde olarak kullanıldığı sentetik atıksularla yapılan çalışmalardan oldukça farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışma için C/N oranı arttıkça Y parametresinin arttığı söylenebilir. Y parametresinin yüksek olması substratın biyokütleye dönüşümünün fazla olması dolayısıyla fazla çamur üretimi anlamına gelmektedir. Bu durum ile ilgili olarak Al-Malack [33]'ün yaptığı

çalışma için MLSS konsantrasyonunun artışı ile Y parametresinin arttığı ve ölüm hızının (k_d) azalması ile açıklanabilir.

Üç reaktör için k_d parametreleri karşılaştırıldığında; aynı MLSS konsantrasyonuna sahip olan aktif çamurlar için C/N oranı arttıkça içsel ayrışma hızı artmıştır. Bulunan k_d değerleri literatürdeki değerlere uygun bulunmuştur. İçsel ayrışma hızının büyük olması aktif çamurun daha hızlı stabil hale geldiğini göstermektedir.

Çizelge 5.2 Literatürde verilen kinetik parametrelerin karşılaştırılması

Numune	T (°C)	μ_{max} (gün ⁻¹)	Y (g/g)	k_d (gün ⁻¹)	K_s (mg/L)	Kaynak
Evsel Atıksu için tipik değer	20	-	0,3-0,6	0,06-0,15	10-60	[12]
Aktif çamur için tipik değer	20	3-12	0,3-0,5	0,06-0,2	5-40	[12]
Evsel	-	3,75	0,67	0,07	-	[35]
Evsel	20	3	0,6	0,06	-	[36]
Glikoz	-	7,4-18,5	0,5-0,62	0,025-0,48	11-181	[37][33]
Glikoz	58	5,2	0,34	0,48	-	[38]
Endüstriyel	53	3,4	0,6	0,52	-	[39]
Endüstriyel	52	6	0,3	0,32	-	[40]
Sentetik	25	1,28-6,46	0,49-0,58	0,037-0,151	289-2933	[33]
Sentetik	-	0,8-6,3	0,42-0,53	0,05-0,19	83-646	[41]
Patates İşleme	-	-	0,61	0,096	8,3	[42]
Patates İşleme	45	0,2	0,71	0,02	25,72	[7]
Kağıt End.	-	2,35	0,47	0,19	500	[43]
Sızıntı suyu	25	0,21	0,28	0,019	11000	[6]
C/N=6	25	1,37	0,60	0,1023	27,96	Bu çalışma
CN=21	25	1,80	0,63	0,1495	9,74	Bu çalışma
CN=40	25	0,71	0,70	0,2912	309,86	Bu çalışma

Sonuç olarak farklı C/N oranlarına sahip sentetik atıksularla işletilen membran biyoreaktör için kinetik ve stokiyometrik katsayılar belirlenmiş ve literatürdeki değerlere yakın değerler bulunmuştur. C/N oranının kinetik ve stokiyometrik parametreleri etkilediği sonucuna varılmıştır.

Sentetik atıksularda elde edilen katsayıların gerçek atıksuları temsil ettiği söylenebilir. Membran biyoreaktördeki aktif çamurun katsayılarının klasik aktif çamurdan farklı olduğu görülmüştür. Respirometrik yöntem ile belirlenen kinetik ve stokiyometrik parametrelerin literatürdeki değerler aralığında oldu görölerek bu yöntemin daha basit, hızlı ve uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmalar sonucunda elde edilen kinetik ve stokiyometrik parametreler, MBR sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde önemli olup bundan sonra yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

MBR için yapılan bu çalışma 40 gün çamur yaşında, 1gr/L MLSS konsantrasyonunda ve sentetik atıksu ile denenmiştir. İlerde yapılabilecek çalışmalar için gerçek atıksularda denemeler yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Roš, M., (1993). *Respirometry of Activated Sludge*, Technomic Publishing Co., Pennsylvania, USA
- [2] Blok, J., (1974). "Respirometric Measurement on Activated Sludge", *Water Research*, 8:11-18
- [3] Blok, J., (1976). "Measurement of The Viable Biomass Concecentration in Activated Sludge by Respirometric Tecniques", *Water Research*, 10:919-925
- [4] Ros, M., Dular, M., ve Farkas, P., A., (1988). "Measurement of Respiration of Activated Sludge", *Water Research*, 22:1405-1411
- [5] Akdemir, Ü.Ö., (2011). *Aktif Çamur Tesislerinde Substrat Konsantrasyonunun Kinetik Parametre Değişimleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [6] İnce, M., (2008). *Düzenli Deponi Sahası Sızıntı Sularının Yüksek Performanslı Kompakt Membran Biyoreaktörlerle Arıtılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, GYTE Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [7] Topaloğlu, A., (2012). *Patates İşleme Endüstrisi Atıksularının Termofilik Püskürtme Çevrimli Membran Biyoreaktörle Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [8] Suschka, J., Ferreira, E., (1986). "Activated Sludge Respirometric Measurements", *Water Research*, 20:137-144.
- [9] Kargı, F., (1995). *Çevre Mühendisliğinde Biyoprosesler*, 234, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayını, İzmir.
- [10] Kargı, F., (2006). *Çevre Mühendisliğinde Biyoprosesler*, 234, 4. Baskı, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayını, İzmir.
- [11] Samsunlu A., (2006). *Atıksuların Arıtılması*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [12] Metcalf and Eddy, (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, Fourt Edition, McGraw- Hill Publishing, New York.
- [13] Judd, S., (2006). *The MBR BOOK Principles and Application of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, Elsevier, Oxford.
- [14] Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, De Koning J., van der Graaf, J., ve Wintgens T., (2006). "Membrane Bioreactor Technology For

- Wastewater Treatment and Reuse", International Conference on Integrated Concepts on Water Recycling, 14-17 February 2005, Wollongong.
- [15] Van der Roest, H.F., Lawrence, D.P., ve van Bentem, A.G.N., (2002). "Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment", IWA Publishing, 11 A, Utrechth.
 - [16] İnce, M., Yildiz, F., Onkal Engin, G., Engin, S.N., ve Keskinler, B., (2008). "Respirometric Kinetic Parameter Calculations of a Batch Jet Loop Bioreactor Treating Leachate and Oxygen Uptake Rate Estimation by DTM", Journal of Hazardous Materials, 153:991-998.
 - [17] Muslu, Y., (2000). Çözümlü Proseslerle Temel Prosesler, Aktif Yayınevi, İstanbul.
 - [18] Eckenfelder, W.W., ve Wetson, C.F., (1956). Kinetics of Biological Oxidation. In Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, 1, Reinhold, New York.
 - [19] Setiadi, T., ve Fairus S., (2003). "Hazardous Waste Landfill Leachate Treatment Using an Activated Sludge-Membrane System", Water Science Technology, 48:111-117.
 - [20] Rodriguez, F.A., Poyatos, J.M., Reboleiro-Rivas, P., Osorio, F., Gonzalez-Lopez, J., ve Hontoria, E., (2011). "Kinetic Study and Oxygen Transfer Efficiency Evaluation Using Respirometric Methods in Submerged Membrane Bioreactor Using Pure Oxygen to Supply the Aerobic Conditions", Bioresource Technology 102:6013-6018.
 - [21] Helle, S., (1999). A respirometric Investigation of the Activated Sludge Treatment of BKME During Steady State and Transient Operating Condition. Thesis, University of British, Columbia.
 - [22] Ciggin, A.S., ve Orhon, D., (2014). "Effect of Storage on the Respirometric Relationship Between Substrate Utilization and Microbial Growth", Bioresource Technology, 167:331-335.
 - [23] Wintgens, T., Melin, T., Schiller, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., ve Thoeve, C., (2005). "The Role of Membrane Processes in Municipal Wastewater", Desalination, 178:1-11.
 - [24] Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., ve Brindle, K., (2000). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, IWA Publishing, London.
 - [25] Ghyoot, W., ve Verstraete, W., (2000). "Reduced Sludge Production in a Two-Stage Membrane-Assisted Bioreactor", Water Research, 34:205–215.
 - [26] Smith, S., Judd, S., Stephenson, T., ve Jefferson, B., (2003). "Membrane bioreactors-hybrid activated sludge or a new process?" Membrane Tech., 5–8.
 - [27] Mueller, J.A., Boyle, W.C., ve Popel, H.J., (2002). Aeration: principles and practice. Eckenfelder, W.W., Malina, J.R. and Patterson, J.W. (eds.) Water Quality Management Library, CRC Press, Boca Raton.

- [28] Rosso, D., ve Stenstrom, M., (2005). "Comparative Economic Analysis of the Impact of Mean Cell Retention Time and Denitrification on Aeration Systems", *Water Research*, 39:3773–3780.
- [29] Ozbek, B., ve Gayik, S., (2001). "The Studies on the Oxygen Mass Transfer Coefficient in a Bioreactor", *Process Biochemical*, 36:729–741.
- [30] Germain E., ve Stephenson T., (2005). "Biomass characteristics, Aeration and Oxygen Transfer in Membrane Bioreactors: Their Interrelations Explained by a Review of Aerobic Biological Processes", *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 4:223–233.
- [31] Nittami, T., Katoh, T., ve Matsumoto, K., (2013). "Modification of Oxygen Transfer Rates in Activated Sludge with Its Characteristic Changes by Addition of Organic Polyelectrolyte", *Chemical Engineering* 225:673-678.
- [32] Puthli, M.S., Rathod, V.K., ve Pandit, A.B., (2005). "Gas Liquid Mass Transfer Studies with Triple Impeller System on a Laboratory Scale Bioreactor", *Biochemical Engineering*, 23:25-30.
- [33] Al-Malack, M. H., (2006). "Determination of Biocinetic Coefficients of an Immersed Membrane Bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 271:47-58.
- [34] Durmaz B., ve Sanin, F.D., (2006). "Effect of Carbon to Nitrogen Ratio on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge ", *Environmental Technology*, 24:1331-1340.
- [35] Lawrence, A.W., ve McCarty, P.L., (1970). "United Basis For Biological Treatment Design and Operation", *J. Sanit. Eng. Div., ASCE* 96:757-778.
- [36] Tchobanglous, G., ve Burton F. L., (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, 3rd Ed. Metcalf and Eddy, Inc., McGraw-Hill, Inc., New York, U.S.A..
- [37] Grady, C.P.L., ve Lim, H.C., (1980). *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [38] Sürücü, G.A., Chian, E.S.K., ve Engelbrecht, R.S., (1976). "Aerobic Thermophilic Treatment of High Strength Wastewaters", *Water Pollution Control*. 48:669-679.
- [39] Jackson, M.L., (1983). "Thermophilic Treatment of a High-Biochemical Oxygen Demand Wastewater: Laboratory, Pilot-Plant and Design". 37th Purdue Industrial Waste Conference, Purdue University, Bell, J.M., (Ed.), Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, U.S.A.
- [40] Couillard, D., ve Zhu, S., (1993). "Thermophilic Aerobic Process for the Treatment of Slaughterhouse Nutrients with Wroetin Recovery", *Environmental Pollution*, 79:121-6.
- [41] Benefield, L.D., ve Randall, C.W., (1980). *Biological Process Design for Wastewater Treatment*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.

- [42] Contreras, E., Bertola, N., ve Zaritzky, N.,(2001). "The Application of Different Techniques to Determine to Activated Sludge Kinetic Parameters in a Food Industry Wastewater", Water SA, 27:169-176.
- [43] Haydar, S., ve Aziz, J.A., (2009). "Kinetic Coefficients for the Biological Treatment Wastewater Using Activated Sludge Process", Engg. & Appl. Sci. 5:39-43.
- [44] Vogelaar, J.C.T., Klapwijk, B., Temmink, H., ve van Lier, J.B., (2003). "Kinetic Comparisons of mesophilic and thermophilic aerobic biomass", Ind. Microbial Biotechnology, 30: 81–88.
- [45] Strotman, U.J., Geldem, A., Kuhn, A., Gendingand, C., ve Klein S., (1998). "Evaluation of Respirometric Test Method to Determine the Heterotrophic Yield Coefficient of Activated Sludge", Chemosphere 15, 38:3555-3570.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Abdulkadir ÇAĞLAK
Doğum Tarihi ve Yeri : Manavgat/ 01.04.1985
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : acaglak@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Süleyman Demirel Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Manavgat YDA Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011	ER Esila Çevre ve İsg Müh. Müş. Lab	Çevre Görevlisi
2009	Yeşilyurt Ambalaj Atıkları T.A.T	Çevre Mühendisi

YAYINLAR

Bildiri

1. The effect of EPS to foluing in submerged MBR (2014) Eurasia Waste Managemet Symposium